

**Elon José Lenzi**

**INFLUÊNCIA DO USO DE CINZAS DA COMBUSTÃO DE  
CARVÃO MINERAL EM ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO**

**Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina como  
parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Civil.**

**Florianópolis - Brasil  
2001**

# **INFLUÊNCIA DO USO DE CINZAS DA COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

*Elon José Lenzi*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

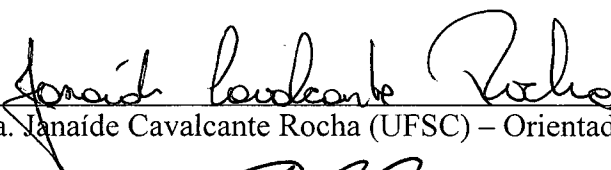
Área de concentração:  
Construção Civil


Orientadora:  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis – Brasil  
2001

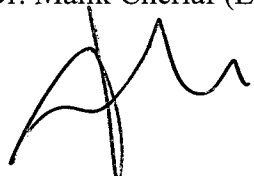
## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 09.03.2001 pela comissão  
examinadora:

  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Janaíde Cavalcante Rocha (UFSC) – Orientadora – Moderadora

  
Prof. Dr. Ing. Humberto Gracher Riella (ENQ/UFSC)

  
Prof. Dr. Malik Cheriaf (ECV/UFSC)

  
Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize (ECV/UFSC)

  
Prof. Dr. Lucilei Cordini – Coordenador do PPGEC

*À minha esposa,  
Miriam,  
e aos meus filhos,  
Pedro e Fernanda.*



## AGRADECIMENTOS

Nesse processo de aprendizado constante que é a vida existem etapas que se caracterizam pelo aspecto técnico e racional em seu desenvolvimento, como esta pesquisa. No entanto, sempre há o lado sensível envolvido, que se apresenta sob a forma de apoio, estímulo, amizade, doação e afeto.

Com esse sentido amplo, quero agradecer àqueles que, além do aspecto técnico, incentivaram meu espírito, em especial:

à Prof.<sup>a</sup> Janaíde, pela paciência e sabedoria;

ao Prof. Malik Cheriaf, pela precisão de seus ensinamentos;

ao Prof. João Cardoso de Lima, por sua didática e seus ensinamentos;

aos professores examinadores, pela dedicação ao exame deste trabalho;

a todos os colegas do Grupo ValoRes, em especial ao João Paulo, pela assiduidade e bom humor; à Flora, pela seriedade e responsabilidade; ao Anderson, pela colaboração constante; e à Caroline, pela objetividade.

à Maria Luiza Lopes de Oliveira, pelo interesse e intercâmbio;

ao amigo Antônio Cândido, pelo apoio traduzido nas oportunidades;

ao meu sogro, Claudionor Cândido, pela generosidade, seriedade e disciplina;

aos meus pais, Eliar Paulo Lenzi e Jurema Santos Lenzi, pela educação, afeto e confiança;

aos meus irmãos Eloína, Eloar e Elói, pelo carinho e tolerância;

aos meus filhos, Pedro Henrique Cândido Lenzi e Fernanda Cândido Lenzi, pela presença divina e estímulo em minha caminhada;

à minha esposa, Miriam Pereira Cândido Lenzi, pela dedicação, doação, tolerância e amor, traduzidos na convivência e na minha ausência;

a Deus, pela certeza de sua presença em todos os momentos.

Agradeço também a empresa Gerasul pela doação das cinzas deste estudo, bem como pelo auxílio financeiro que permitiu a realização dos ensaios.

SUMÁRIO

*Lista de Figuras* \_\_\_\_\_ *xi*

*Lista de Tabelas* \_\_\_\_\_ *xv*

*Lista de Abreviaturas* \_\_\_\_\_ *xviii*

*Resumo* \_\_\_\_\_ *xx*

*Abstract* \_\_\_\_\_ *xxi*

**1    Introdução** \_\_\_\_\_ **1**

**1.1    Apresentação** \_\_\_\_\_ **1**

**1.2    Delimitações da Pesquisa** \_\_\_\_\_ **6**

**1.3    Objetivos da Pesquisa** \_\_\_\_\_ **7**

        1.3.1    Objetivo Geral \_\_\_\_\_ 7

        1.3.2    Objetivos Específicos \_\_\_\_\_ 7

**1.4    Hipóteses** \_\_\_\_\_ **9**

        1.4.1    Hipótese Geral \_\_\_\_\_ 9

        1.4.2    Hipóteses Subjacentes \_\_\_\_\_ 9

**1.5    Estrutura do Trabalho** \_\_\_\_\_ **9**

**2    Revisão Bibliográfica** \_\_\_\_\_ **11**

**2.1    Resgate Histórico da Linha de Pesquisa** \_\_\_\_\_ **11**

**2.2    Revestimentos em Argamassas** \_\_\_\_\_ **12**

**2.3    Agregado Miúdo** \_\_\_\_\_ **15**

**2.4    Cinzas de Carvão Mineral Pulverizado** \_\_\_\_\_ **17**

        2.4.1    Cinza Volante \_\_\_\_\_ 18

        2.4.2    Cinza Pesada \_\_\_\_\_ 19

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>2.5</b> | <b>A Escolha do Traço-Base</b>                      | <b>21</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Propriedades das Argamassas no Estado Fresco</b> | <b>22</b> |
| 2.6.1      | Teor de Água  | 22        |
| 2.6.2      | Teor de Ar Incorporado                              | 24        |
| 2.6.3      | Retenção de Água                                    | 25        |
| 2.6.4      | Exsudação   | 28        |
| 2.6.5      | Tempo de Pega                                       | 29        |
| 2.6.6      | Massa Específica                                    | 30        |
| <b>2.7</b> | <b>Propriedades no Estado Endurecido</b>            | <b>30</b> |
| 2.7.1      | Resistência à Compressão                            | 30        |
| 2.7.1.1    | Pozolanicidade                                      | 30        |
| 2.7.1.2    | Solicitações das Argamassas                         | 32        |
| 2.7.2      | Resistência de Aderência à Tração                   | 33        |
| 2.7.3      | Massa Específica                                    | 34        |
| 2.7.4      | Índice de Vazios                                    | 35        |
| 2.7.5      | Absorção por Capilaridade                           | 35        |
| 2.7.6      | Absorção por Baixa Pressão (Método do Cachimbo)     | 37        |
| <b>2.8</b> | <b>Reações de Endurecimento das Argamassas</b>      | <b>38</b> |
| 2.8.1      | Análise Térmica Diferencial                         | 39        |
| 2.8.2      | Difração de Raios X                                 | 40        |
| <b>3</b>   | <b>Metodologia e Materiais</b>                      | <b>44</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Características dos Materiais</b>                | <b>45</b> |
| 3.1.1      | Cimento   | 45        |
| 3.1.2      | Cal   | 45        |
| 3.1.3      | Areia   | 46        |
| 3.1.4      | Cinza Leve (czl)                                    | 51        |
| 3.1.5      | Cinza Pesada (czp)                                  | 52        |
| 3.1.6      | Água  | 54        |
| <b>3.2</b> | <b>Produção das Argamassas</b>                      | <b>54</b> |
| 3.2.1      | Traços  | 55        |
| 3.2.2      | Pasta de Cal  | 56        |
| 3.2.3      | Preparação das Argamassas                           | 57        |
| <b>3.3</b> | <b>Ensaio no Estado Fresco</b>                      | <b>58</b> |
| 3.3.1      | Teor de Água  | 58        |
| 3.3.2      | Teor de Ar Incorporado                              | 58        |
| 3.3.3      | Retenção de Água                                    | 59        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.3.4      | Exsudação  | 59         |
| 3.3.5      | Tempos de Pega   | 59         |
| 3.3.6      | Massa Específica   | 60         |
| <b>3.4</b> | <b>Ensaio no Estado Endurecido</b>                               | <b>60</b>  |
| 3.4.1      | Resistência à Compressão   | 60         |
| 3.4.2      | Massa Específica   | 61         |
| 3.4.3      | Índice de Vazios   | 62         |
| 3.4.4      | Absorção de Água   | 62         |
| 3.4.4.1    | Absorção de Água por Imersão                                     | 62         |
| 3.4.4.2    | Absorção de Água por Capilaridade                                | 62         |
| 3.4.4.3    | Absorção de Água por Baixa Pressão (Método do Cachimbo)          | 63         |
| 3.4.5      | Aderência à Tração   | 64         |
| 3.4.6      | Análise Térmica Diferencial                                      | 65         |
| 3.4.7      | Difração de Raios X  | 66         |
| <b>4</b>   | <b><i>Apresentação e Análise dos Resultados</i></b>              | <b>67</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Composição da Areia</b>                                       | <b>67</b>  |
| <b>4.2</b> | <b>Resultados dos Ensaio das Argamassas no Estado Fresco</b>     | <b>69</b>  |
| 4.2.1      | Teor de Água   | 69         |
| 4.2.2      | Teor de Ar Incorporado   | 72         |
| 4.2.3      | Retenção de Água   | 73         |
| 4.2.4      | Exsudação  | 74         |
| 4.2.5      | Tempo de Pega  | 76         |
| 4.2.6      | Massa Específica   | 77         |
| <b>4.3</b> | <b>Resultados dos Ensaio das Argamassas no Estado Endurecido</b> | <b>80</b>  |
| 4.3.1      | Resistência à Compressão   | 80         |
| 4.3.2      | Massa Específica   | 83         |
| 4.3.3      | Índice de Vazios   | 84         |
| 4.3.4      | Absorção de Água   | 86         |
| 4.3.4.1    | Absorção de Água por Imersão                                     | 86         |
| 4.3.4.2    | Absorção de Água por Capilaridade                                | 87         |
| 4.3.4.3    | Absorção de Água por Baixa Pressão                               | 89         |
| 4.3.5      | Aderência à tração   | 90         |
| 4.3.6      | Análise Térmica Diferencial                                      | 93         |
| 4.3.7      | Difração de Raios X  | 102        |
| <b>4.4</b> | <b>Discussão</b>   | <b>109</b> |
| <b>5</b>   | <b><i>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</i></b>      | <b>117</b> |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>5.1</b> | <b>Conclusões</b>                        | <b>117</b> |
| 5.1.1      | Cinza Leve                               | 117        |
| 5.1.2      | Cinza pesada                             | 118        |
| <b>5.2</b> | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>  | <b>119</b> |
| <b>6</b>   | <b><i>Referências Bibliográficas</i></b> | <b>121</b> |
| <b>7</b>   | <b><i>Anexos</i></b>                     | <b>129</b> |

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - Influência do teor de cinza volante no material cimentício (em massa) sobre a resistência da pasta de cimento hidratada (Odler, 1991). \_\_\_\_\_ 3
- Figura 1.2 - Resistência à compressão de concretos com e sem cinza volante em diferentes idades; cura à temperatura de 21°C (Ravina, 1998). \_\_\_\_\_ 4
- Figura 1.3 - Retração por secagem de misturas de concreto com cinza volante em substituição parcial à areia fina e do concreto de referência; cura à temperatura de 21°C (Ravina, 1998). \_\_\_\_\_ 5
- Figura 2.1 - Resistência à compressão e à tração aos 28 dias de idade em função do módulo de finura para as areias classificadas pelo coeficiente de uniformidade (Tristão, 1995).\_\_ 16
- Figura 2.2 - Influência da massa unitária da areia na resistência à compressão das argamassas (Carneiro *et al.*, 1997). \_\_\_\_\_ 17
- Figura 2.3 - Curvas granulométricas de Fuller (Neville, 1997). \_\_\_\_\_ 22
- Figura 2.4 - Índice de consistência para argamassas com índice 0 de trabalhabilidade (mesma trabalhabilidade qualitativa) em função do teor de ar incorporado (Cavani *et al.*, 1997). \_\_\_\_\_ 24
- Figura 2.5 - Perda de água de argamassas em função do tijolo (g/min./194 cm<sup>2</sup>) (Sabbatini, 1984). 26
- Figura 2.6 - Resistência de aderência à tração sobre bloco cerâmico (Levy e Helene, 1995). \_\_\_\_\_ 33
- Figura 2.7 - Influência da relação água/cimento e dimensão máxima do agregado na permeabilidade do concreto: (a)  $K_q$  é uma medida relativa do fluxo de água através do concreto em metros cúbicos por ano por metro quadrado de área para um gradiente hidráulico unitário. [(a) De *Concrete Manual*, 8<sup>th</sup> Edition, U. S. Bureau of

|  |    |
|--|----|
| Reclamation, 1975, p.37, (b) adaptado de <i>Beton-Bogen</i> , Aalborg Cement Co., Aalborg, Denmark, 1979]. (Mehta e Monteiro, 1994).   | 38 |
| Figura 2.8 - Comparação entre a relação de consumo de hidróxido de cálcio pela cinza pesada e <i>filler</i> inerte, obtido por meio de análise térmica diferencial (ATD), e a resistência à compressão da argamassa de cinza pesada e cal, aos 7, 14, 28 e 90 dias de hidratação (dados plotados de Cheriaf <i>et al.</i> , 1999). | 40 |
| Figura 2.9 - Representação da Geometria $\theta - 2\theta$ .   | 41 |
| Figura 2.10 - Representação geométrica da lei de Bragg .   | 41 |
| Figura 2.11 - Difractogramas de raios X das cinzas leves classes F e C ASTM (Malhotra e Mehta, 1996).  | 43 |
| Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia de Sertão do Campo em comparação com os limites da areia média, zona 3, da NBR 7211, 1983.  | 47 |
| Figura 3.2 - Composição A (CZP+AREIA) em comparação com os limites da areia média, zona 3.   | 50 |
| Figura 3.3 - Curva granulométrica da cinza pesada após desagregação.   | 53 |
| Figura 3.4 - Aparato para medir a absorção de água, montado na parede em estudo (método do cachimbo).  | 64 |
| Figura 4.1 - Composições das frações de areia – Relação entre massa unitária e módulo de finura.   | 68 |
| Figura 4.2 - Teor de água das argamassas em relação aos materiais constituintes (massa).   | 71 |
| Figura 4.3 - Teor médio de ar incorporado entre as argamassas estudadas.   | 72 |
| Figura 4.4 - Retenção de água de argamassas com teores de substituição de cinza leve e cinza pesada.   | 73 |
| Figura 4.5 - Exsudação acumulada em função do tempo por teores de substituição.  | 75 |
| Figura 4.6 - Massa específica das argamassas no estado fresco em relação ao teor de cinzas (valores médios).   | 78 |
| Figura 4.7 - Resistências à compressão das argamassas, nas quatro idades investigadas.   | 80 |
| Figura 4.8 - Resistência média à compressão das argamassas, nas idades estudadas.  | 82 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.9 - Massa específica real das argamassas, em função dos teores de cinzas.  | 84  |
| Figura 4.10 - Índice de vazios das argamassas no estado endurecido.   | 84  |
| Figura 4.11 - Relação água/materiais secos e índice de vazios em função do teor de cinza pesada das argamassas em estudo.       | 85  |
| Figura 4.12 - Absorção de água por imersão, nas argamassas classificadas pelo teor de cinza leve.                               | 86  |
| Figura 4.13 - Absorção de água por capilaridade nas argamassas, pelo teor de cinzas.  | 87  |
| Figura 4.14 - Absorção de água das argamassas por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo.                             | 88  |
| Figura 4.15 – a) Altura capilar média das argamassas; b) Corpos-de-prova: argamassas 5, 6, 7 e 8.                               | 89  |
| Figura 4.16 - Absorção por baixa pressão (método do cachimbo) das argamassas, em função do teor de cinzas.                      | 89  |
| Figura 4.17 - Resistência de aderência à tração nas argamassas com variação dos teores de cinzas.                               | 92  |
| Figura 4.18 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 1, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.                          | 94  |
| Figura 4.19 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 2, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.                          | 95  |
| Figura 4.20 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.                          | 96  |
| Figura 4.21 – Área do pico (ATD) da transformação da brucita nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.    | 97  |
| Figura 4.22 - Área do pico (ATD) da transformação da portlandita nas argamassas 1, 2 e 3 nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias. | 98  |
| Figura 4.23 – Área do pico (ATD) da transformação do quartzo nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.    | 100 |
| Figura 4.24 – Área de do pico (ATD) da transformação da calcita nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias. | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.25 - Difratoograma de raios X da argamassa 1, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias. a) espectro total [ $15^\circ < 2\theta < 60^\circ$ ]; b) espectro parcial reduzido [ $26^\circ < 2\theta < 28,5^\circ$ ]. | 103 |
| Figura 4.26 - Difratoograma de raios X da argamassa 2, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias.  | 104 |
| Figura 4.27 - Difratoograma de raios X da argamassa 3, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias.  | 105 |
| Figura 4.28 - Picos da brucita no ensaio de DRX para a) $d_{10}=2,365\text{\AA}$ e b) $d_8=4,77\text{\AA}$ .  | 106 |
| Figura 4.29 - Picos da portlandita no ensaio de DRX, para $d_{10}=2,628\text{\AA}$ ( <i>hkl</i> 101).   | 106 |
| Figura 4.30 - Picos do quartzo no ensaio de DRX, para $d_{10}=3,3325\text{\AA}$ ( <i>hkl</i> 101), nas argamassas 1, 2 e 3.   | 108 |
| Figura 4.31 - Comparação entre os picos de DRX entre a portlandita e quartzo das argamassas 1 e 3.  | 108 |
| Figura 4.32 - Picos de calcita no ensaio DRX para $d_{10}=3,028\text{\AA}$ , nas argamassas 1, 2 e 3.   | 109 |
| Figura 4.33 - Comparação entre a massa específica real e o índice de vazios das argamassas.   | 112 |
| Figura 4.34 - Resistência à compressão aos 90 dias, em função da massa específica das argamassas.   | 113 |
| Figura 4.35 - Quadro esquemático de influência entre as propriedades das argamassas.  | 116 |
| Figura A-1 - Difratoograma de raios X do cimento CP I S.  | 129 |
| Figura A-2 - Difratoograma de raios X da cal hidratada após período de maturação.   | 129 |
| Figura A-3 - Difratoograma de raios X da cal hidratada antes do período de maturação.   | 130 |
| Figura A-4 - Análise térmica diferencial da cal hidratada após período de maturação.  | 130 |
| Figura A-5 - Análise térmica diferencial das cinzas leve e pesada usadas neste estudo.  | 131 |
| Figura A-6 - Difratoograma de raios X da cinza leve e cinza pesada.   | 131 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Função do revestimento <i>versus</i> propriedade da argamassa e do conjunto (Adaptado de CINCOTTO <i>et al.</i> , 1995)  | 15 |
| Tabela 2.2 - Usos percentuais aproximados dos resíduos da combustão de carvão (Pozzobon, 1999)  | 18 |
| Tabela 2.3 - Proporções das misturas de concreto com incorporação de cinzas leve canadenses (Carette e Malhotra, 1984 <i>apud</i> Malhotra e Mehta, 1996)   | 25 |
| Tabela 2.4 - Propriedades das argamassas no estado fresco, com substituição de areia por "arenoso" (Carvalho e Cavalcanti Jr, 1997)   | 27 |
| Tabela 2.5 - Análise granulométrica da areia e "arenoso" (adaptado de Carvalho e Cavalcante Jr, 1997)   | 27 |
| Tabela 2.6 - Resultados dos ensaios de argamassas no estado fresco, com substituição da cal por pó de granito (Calmon <i>et al.</i> , 1997)   | 28 |
| Tabela 2.7 – Taxa máxima de exsudação, em $\text{kg/m}^2/\text{h}$ ; quantia total em $\text{kg/m}^2$ e percentual, e duração de exsudação de concretos com e sem cinza leve ( $125 \text{ kg/m}^3$ ) como substituição parcial de areia (Ravina, 1997)                           | 29 |
| Tabela 2.8 - Tempos de pega de concretos com algumas cinzas leves canadenses incorporadas – (adaptado de Carette e Malhotra, 1984)  | 29 |
| Tabela 2.9 - Atividade pozolânica da cinza pesada com cal (Cheriat <i>et al.</i> , 1999)  | 32 |
| Tabela 2.10 - Resistência média à compressão simples aos 28 dias de idade, de seis cps, tanto das argamassas produzidas na obra, quanto das argamassas teóricas, reproduzidas depois no laboratório. Argamassas identificadas pelo tipo de plastificante (Siqueira e Selmo, 1995) | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.11 - Absorção de água das argamassas com teores de substituições de areia por “arenoso” (Carvalho e Cavalcanti Jr, 1997) | 37 |
| Tabela 2.12 - Absorção de água das argamassas com teores de substituições de cal por pó de granito (Calmon et al., 1997)          | 37 |
| Tabela 3.1 - Laudo técnico – Cimento Portland CP I S - 32 (Cimento Rio Branco S.A., março/2000)                                   | 45 |
| Tabela 3.2 - Massa unitária do cimento CP I – S   | 45 |
| Tabela 3.3 - Análise química da cal hidratada   | 46 |
| Tabela 3.4 - Massa unitária da cal hidratada  | 46 |
| Tabela 3.5 - Análise granulométrica da areia de Sertão do Campo   | 47 |
| Tabela 3.6 - Resultados das composições das areias  | 49 |
| Tabela 3.7 - Composições de areia e cinza pesada - Massa unitária   | 50 |
| Tabela 3.8 - Análise química da cinza leve  | 51 |
| Tabela 3.9 - Massa unitária da cinza leve   | 51 |
| Tabela 3.10 - Massa específica aparente da cinza leve utilizada nas argamassas  | 51 |
| Tabela 3.11 - Análise granulométrica da Cinza Pesada Bruta  | 52 |
| Tabela 3.12 - Análise granulométrica da Cinza Pesada sem torrões  | 53 |
| Tabela 3.13 - Análise química da cinza pesada   | 53 |
| Tabela 3.14 - Massa unitária da cinza pesada  | 54 |
| Tabela 3.15 - Massa específica aparente da cinza pesada utilizada nas argamassas  | 54 |
| Tabela 3.16 - Esquema da identificação das argamassas em função das substituições   | 54 |
| Tabela 3.17 - Características físicas dos materiais componentes das argamassas  | 55 |
| Tabela 3.18 - Argamassas – Traços em massa e em volume  | 56 |
| Tabela 4.1- Composições de areia–cinza pesada - Massa unitária  | 68 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.2 - Teor de água das argamassas estudadas _____  | 69  |
| Tabela 4.3 - Tempos de pega das argamassas com teores-limite de cinzas _____  | 76  |
| Tabela 4.4 - Massa específica das argamassas no estado fresco _____   | 78  |
| Tabela 4.5 - Resistência de aderência à tração com os respectivos coeficientes de variação _____                      | 90  |
| Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de aderência à tração das argamassas em estudo _____                              | 91  |
| Tabela 4.7 - Qualificação das argamassas pelas propriedades estudadas _____   | 115 |
| Tabela 4.8 - Identificação dos teores de cinzas com melhor desempenho nas propriedades das argamassas estudadas _____ | 116 |
| Tabela A-1 - Laudo de análise - Cal hidratada CH-III (Cal Cem Ind. de Minérios Ltda., julho/2000) _____               | 132 |
| Tabela A-2 - Resistência à compressão – Tratamento estatístico dos resultados _____                                   | 132 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                  |  |
|------------------|--|
| a/agl.           | Relação água/aglomerantes em massa   |
| a/c              | Relação água/cimento em massa  |
| a/mat.secos      | Relação água/materiais secos em massa  |
| ABNT             | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ASTM             | <i>American Society for Testing and Materials</i>  |
| ATD              | Análise Térmica Diferencial  |
| C                | Absorção de água por capilaridade  |
| CANMET           | <i>Canada Center for Mineral Energy Technology</i>   |
| CASAN (SC)       | Companhia de Saneamento do Estado de Santa Catarina  |
| CH-I             | Cal Hidratada, classe I pela NBR 7175, 1992  |
| CH-III           | Cal Hidratada, classe III pela NBR 7175, 1992  |
| cim              | Cimento  |
| CP I – S         | Cimento Portland com adição  |
| CP I             | Cimento Portland Comum   |
| Cps              | Corpos-de-prova  |
| C-S-H            | Silicato de Cálcio Hidratado   |
| CSTC             | <i>Centre Scientifique et Technique de la Construction</i>   |
| Cu, $K_{\alpha}$ | Comprimento de onda característico da radiação do cobre  |
| CZL              | Cinza leve   |
| CZP              | Cinza pesada   |
| d                | Distância interplanar dos sucessivos planos do cristal   |
| $d_{10}$         | Distância entre planos adjacentes de um cristal com intensidade máxima na difração de raios X        |
| $d_8$            | Distância entre planos adjacentes de um cristal com 80% da intensidade máxima na difração de raios X |
| DIN              | <i>Deutsches Institut für Normung</i>  |
| DRX              | Difração de Raios X  |
| $f_{ci}$         | Resistência média característica aos (i) dias de cura  |
| <i>hkl</i>       | Designação para as coordenadas dos planos da rede cristalina (Miller)                                |

|           |  |
|-----------|--|
| IAP       | Índice de Atividade Pozolânica                                       |
| INSA      | <i>Institut National des Sciences Appliquées</i>                     |
| ISO       | <i>International Organization for Standardization</i>                |
| $I_v$     | Índice de vazios   |
| JCPDS     | <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i>               |
| ME        | Massa específica aparente  |
| MF        | Módulo de Finura   |
| MPa       | Megapascal   |
| MU        | Massa unitária   |
| n         | Número inteiro de comprimento de onda                                |
| NBR       | Norma Brasileira   |
| NIT       | <i>Note D'Information Technique</i>                                  |
| PVC       | Policloreto de vinila  |
| $R^2$     | Coefficiente de correlação linear                                    |
| RILEM     | <i>Réunion Internationale des Laboratoires D'Essais et Matériaux</i> |
| SC        | Estado de Santa Catarina   |
| UFSC      | Universidade Federal de Santa Catarina                               |
| URGC      | <i>Groupement de Recherche d'Urbanism et Génie Civil</i>             |
| $\theta$  | Ângulo entre o plano atômico e os feixes incidente e refletido       |
| $\lambda$ | Comprimento de onda da radiação incidente                            |

## RESUMO

Há muito tempo, estudiosos de todo o mundo encontram alternativas para a disposição das cinzas de carvão mineral, desde o uso como aterro até o uso como materiais constituintes de produtos manufaturados para a indústria da construção civil.

Assim como os demais, neste estudo buscam-se alternativas de aproveitamento desses resíduos nessa área. Para tanto, são contempladas as cinzas provenientes da combustão de carvão mineral da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, no Estado de Santa Catarina.

Neste estudo, foram avaliadas 15 argamassas mistas, traço **1 : 2 : 9** (volume) para revestimento, nas quais se variou o teor de substituição do cimento por cinza leve (**0,20, 30, 40 e 50%** em volume) e o teor de substituição de areia por cinza pesada (**0,50 e 100%** em volume). O teor de água foi fixado em função da consistência (**255±10 mm**). A demanda de água aumentou com os teores de cinza pesada, induzindo a uma massa específica reduzida (até **25%**), aumento da exsudação e da absorção de água. Por outro lado, houve um aumento considerável na resistência à compressão a partir de 28 dias, juntamente com a identificação de atividade pozolânica entre a sílica amorfa da cinza e o hidróxido de cálcio da cal e ou da hidratação do cimento.



## ABSTRACT

For a long time, researchers all over the world have been trying to find alternative uses for mineral coal ashes, from landfilling to their use as a component of products in the building construction.

Like other studies on this subject, this one seeks alternative uses for mineral coal ashes resulting from mineral coal combustion in Jorge Lacerda Thermoelectric Plant, in the State of Santa Catarina.

15 mixed mortars for coating in ratios of **1 : 2 : 9** were evaluated for this study. Each mixture varied in the dosage of cement substitution for fly ash (**0, 20, 30, 40 and 50%** in volume), and in the dosage of sand substitution for bottom ash (**0,50 and 100%** in volume). The amount of water was kept constant in function of consistency (**255±10 mm**). Water demand increased as dosages increased, inducing a reduced specific mass (up to **25%**) and an increased water exudation and absorption. On the other hand, there was a considerable increase in the compressive strength from the 28th on, along with identification of pozzolanic activity between the amorphous silica from the ash and the calcium hydroxide from the lime.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

O uso de novos materiais na indústria da construção civil, sobretudo os materiais provenientes de resíduos industriais, tem sido cada vez mais intenso. Existem pelo menos duas razões básicas que induzem a essa realidade: a primeira deve-se ao grande volume de materiais que a construção civil demanda, e a segunda é devido à vinculação do tema, à valorização e ao uso de resíduos industriais no setor da construção civil e na área de proteção ambiental.

Entre esses resíduos encontram-se as cinzas da combustão do carvão mineral. O carvão mineral, após sua extração, passa por um processo de beneficiamento de redução de impurezas, como argilas, arenitos e xistos argilosos, chamados resíduos de lavra, que cobrem ou estão intercalados com as camadas de carvão (Rissato e Souza, 1985).

Posteriormente o carvão é transportado até a usina termelétrica e é moído, resultando em finura onde mais de 75% das partículas passam pela peneira de malha quadrada com 0,075 mm de aresta (Malhotra e Mehta, 1996). Esse carvão moído é então pulverizado no interior da caldeira passando por várias zonas de temperatura em que a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto que as impurezas minerais são fundidas e permanecem em suspensão nos gases da combustão. Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundidas são resfriadas rapidamente (de 1500°C para 200°C em poucos segundos), solidificando-se como partículas esféricas vítreas. Algumas dessas partículas se aglomeram para formar as cinzas pesadas (*bottom ashes*) que caem no fundo da caldeira e são recolhidas por esteiras rolantes, enquanto que as demais são transportadas com o fluxo do gás da combustão, chamadas cinzas volantes ou cinzas

leves (*fly ashes*), e são em grande parte captadas por uma série de separadores mecânicos e precipitadores eletrostáticos ou filtros.

Conforme Pozzobon (1999), no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, situado no município catarinense de Capivari de Baixo, o armazenamento dessas cinzas é diferenciado. As cinzas pesadas, após desmanche dos grumos, são bombeadas com água para as lagoas de decantação, permanecendo ali até o completo preenchimento dessas lagoas, quando então são removidas e depositadas em outra aplicação ambiental (Recuperação da área degradada do Banhado da Estiva). As cinzas leves, em função do manejo a seco, são depositadas em silos e parcialmente vendidas para uso na fabricação de cimentos. A parte não comercializada dessas cinzas é despejada nas lagoas de decantação mencionadas, tendo o mesmo fim que as cinzas pesadas. Assim, as cinzas não aproveitadas constituem um grande passivo ambiental no sistema de geração termelétrica do Estado de Santa Catarina.

Nesse contexto, buscam-se cada vez mais alternativas para aproveitamento desses resíduos na construção civil.

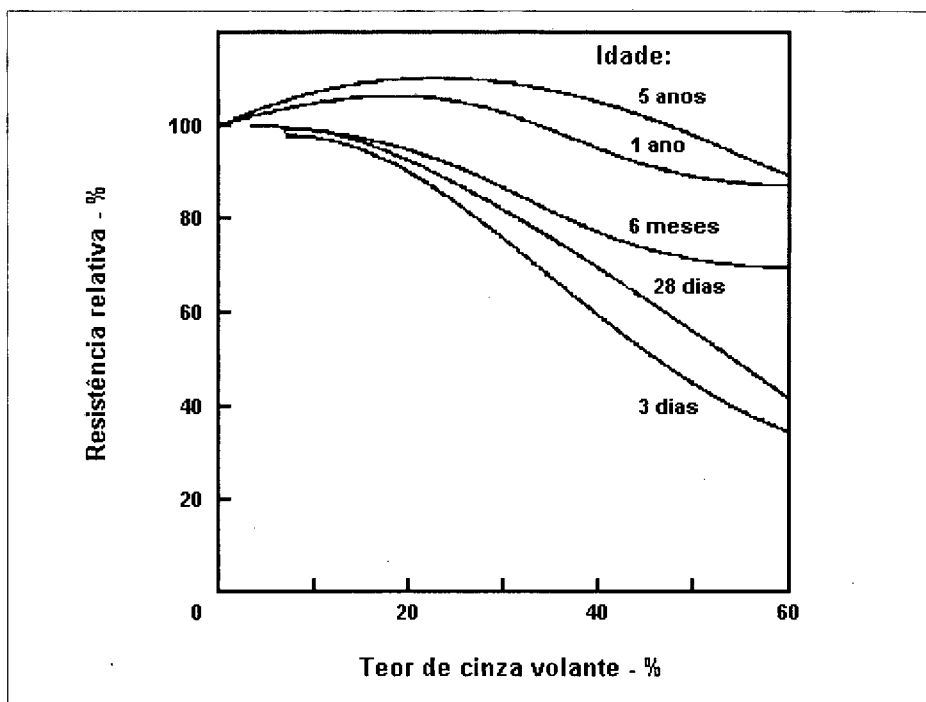
Malhotra e Mehta (1996) acreditam que, no futuro, o uso de cinzas como materiais pozolânicos e cimentantes em concreto, virá associado à realização de benefícios ecológicos. “Muitos destes subprodutos contêm elementos tóxicos que podem ser perigosos, se não forem dispostos de maneira segura... . A indústria do cimento e do concreto oferece um lugar adequado para os subprodutos pozolânicos e cimentantes porque a maioria dos metais tóxicos presentes nestes subprodutos podem ser permanentemente enclausurados no interior dos produtos da hidratação do cimento Portland”.

Ao longo do tempo, diversas pesquisas têm procurado encontrar alternativas para a disposição desses resíduos industriais – principalmente como material de aterro – como materiais constituintes de produtos manufaturados para a indústria da construção civil. Já a cinza leve tem seu uso consolidado como adições pozolânicas do cimento Portland.

Tendo em vista a grande disponibilidade das cinzas da geração termelétrica no Estado de Santa Catarina, busca-se nesta pesquisa alternativa de aproveitamento desses

resíduos na construção civil. Para tanto, contemplam-se as cinzas provenientes da combustão de carvão mineral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

Nas pesquisas, a cinza leve tem sido bastante enfocada dentre as cinzas de combustão de carvão, cujo uso em concreto tem sido largamente estudado, constatando-se que algumas propriedades dos concretos produzidos com esse material são melhoradas, como: a resistência à compressão (figuras 1.1 e 1.2) e a retração por secagem (figura 1.3), [Odler, 1991 e Ravina, 1998].



**Figura 1.1 - Influência do teor de cinza volante no material cimentício (em massa) sobre a resistência da pasta de cimento hidratada (Odler, 1991).**

Odler (1991), em seu relatório final referente à hidratação do cimento, comenta que o efeito de materiais pozolânicos sobre o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento tem sido objeto de muitos estudos. Geralmente se acredita que a taxa inicial de desenvolvimento da resistência é lenta, apesar de existirem significativas diferenças entre essas pozolanas, como por exemplo a reatividade. Por outro lado, a resistência final na maioria dos casos situa-se acima da resistência da pasta de referência. Para pastas com alto teor de pozolana até mesmo a resistência final pode estar abaixo da resistência da pasta de referência. A figura 1.2 mostra o efeito da pozolana sobre a resistência à compressão para diferentes teores de substituição de cimento Portland por pozolana, em diferentes idades.

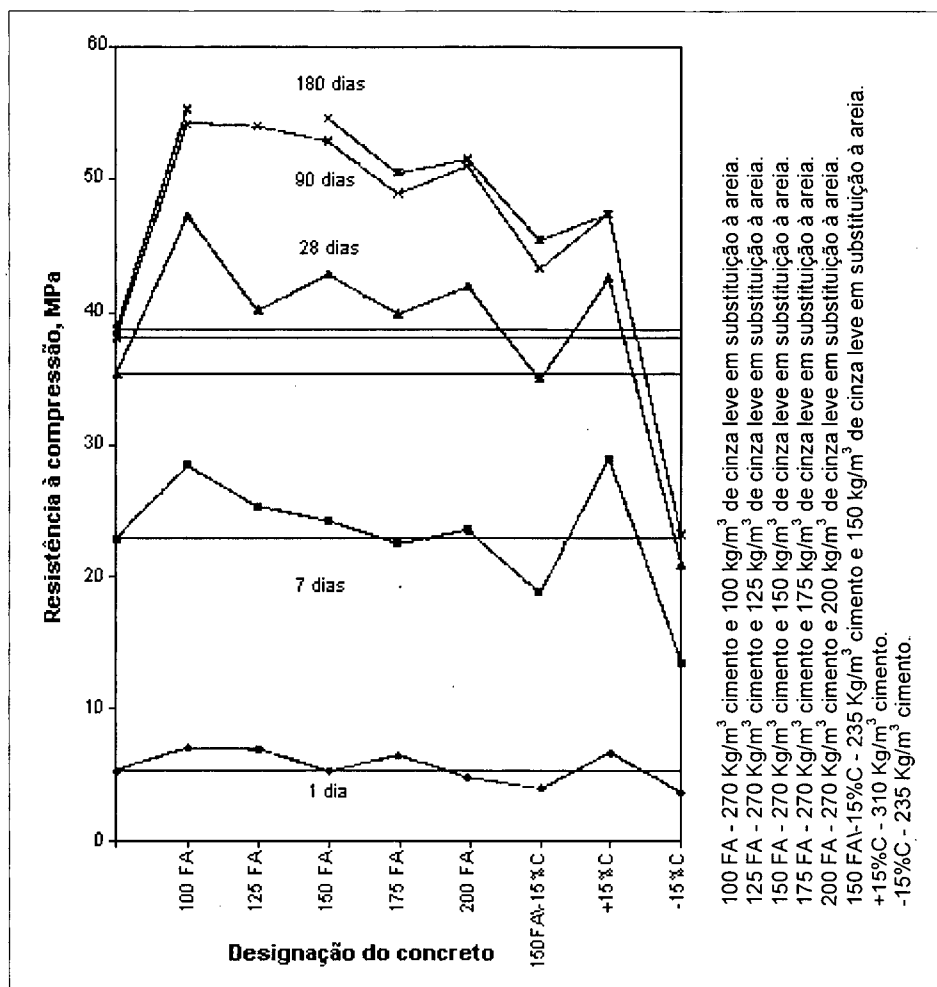


Figura 1.2 - Resistência à compressão de concretos com e sem cinza volante em diferentes idades; cura à temperatura de 21°C (Ravina, 1998).

Ravina (1998), estudando o efeito da incorporação de altos teores de cinza volante em substituição parcial de areia fina nas propriedades mecânicas de concreto estrutural, concluiu que tais substituições trazem efeitos benéficos sobre a resistência à compressão desses concretos. Foram observados diferentes mecanismos que influenciaram nesse desempenho.

Nas idades prematuras, o efeito *filler* é provavelmente o maior fator contribuinte para a resistência à compressão. Os materiais finamente divididos exercem dois efeitos positivos: melhoram o empacotamento e induzem reações físico-químicas. As partículas finas podem servir como núcleo de precipitação dos hidratos do cimento, acelerando o processo de hidratação química. Conseqüentemente, a cinza volante pode modificar a microestrutura da pasta de cimento endurecida [Ravina (1998)].

O processo de acréscimo de resistência nas idades maduras pode ser atribuído à natureza pozolânica da cinza volante. Embora a cinza utilizada tivesse baixa

reatividade, acredita-se que com altos teores de cinza volante as reações pozolânicas aconteçam. Os resultados são mostrados na figura 1.2.

Ravina (1998) e Odler (1991) prevêm que, em futuro próximo, as misturas de concreto sem materiais pozolânicos ou cimentantes serão uma exceção à regra.

A história do uso de materiais pozolânicos e cimentantes relatada por Lea (1970) já era conhecida por gregos, romanos, indianos e egípcios há 3500-4000 anos. “A descoberta e uso de cales hidráulicas (cales impuras continham quantias substanciais de argila calcinada) durante o século 18 foi o fato precursor da invenção do cimento Portland em 1824. Devido ao rápido tempo de pega e endurecimento do cimento Portland, ele se tornou o favorito material cimentante na indústria da construção ao invés dos cimentos cal-pozolana. Contudo, devido aos fatores tecnológicos, econômicos e ecológicos, grande quantidade de materiais pozolânicos continuam em uso atualmente, na forma de adições minerais em cimento Portland e em concretos”.

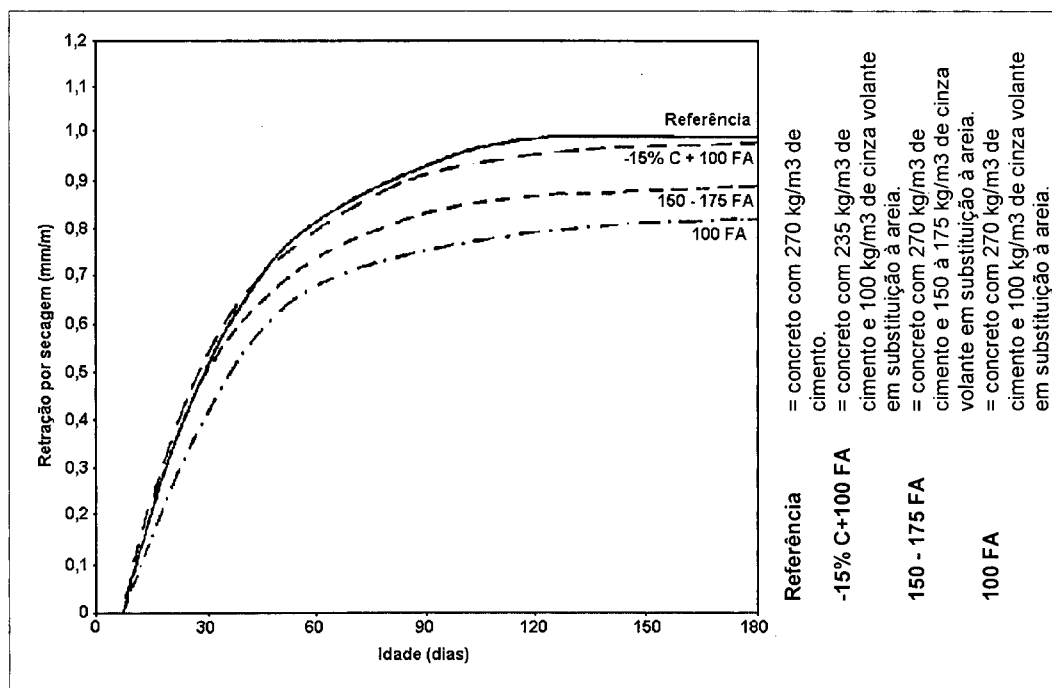


Figura 1.3 - Retração por secagem de misturas de concreto com cinza volante em substituição parcial à areia fina e do concreto de referência; cura à temperatura de 21°C (Ravina, 1998).

O custo econômico (matriz energética) e ambiental (redução das emissões poluentes) para se produzir cimento Portland é mais elevado do que substituí-lo parcialmente por subprodutos industriais com características pozolânicas ou cimentantes, obtendo-se com

isso ganhos nas características de desempenho desses compósitos e ganho em proteção ambiental devido à disposição segura desses subprodutos.

Baseado nesses aspectos, este estudo busca viabilizar tecnicamente o uso de cinzas da queima de carvão mineral, sobretudo a cinza pesada, nas argamassas mistas de revestimentos.

Por suas características físico-químicas, o uso desses subprodutos da queima de carvão mineral é associado a produtos que contenham hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ . Estes são geralmente a cal hidratada e/ou cimento Portland, que misturados com as cinzas de carvão e em presença de água reagem quimicamente, combinando o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  dos aglomerantes com óxido de silício  $[\text{SiO}_2]$  na fase vítrea das cinzas, resultando o C-S-H que melhora as características de desempenho do compósito.

Nesse contexto, este estudo aborda três aspectos principais: (1) o ajuste da granulometria da areia mais a cinza pesada, objetivando proporcionar uma massa unitária<sup>1</sup> maior para esses agregados; (2) a substituição parcial do cimento Portland por cinza leve; e (3) a substituição parcial e total do agregado miúdo por cinza pesada, permitindo avaliar o desempenho combinado das diversas proporções de substituição.

A partir de um traço-base de uso consagrado (**1 : 2 : 9, cimento : cal : areia**) compõem-se traços de argamassas em que se variou a substituição em volume de cimento Portland por cinza leve, nas proporções de 0%, 20%, 30%, 40% e 50%, e a substituição em volume de areia por cinza pesada, nas proporções de 0%, 50% e 100%, obtendo-se, assim, 15 traços diferentes de argamassas, cujas propriedades foram estudadas.

## 1.2 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este estudo limita-se às características dos lotes dos materiais utilizados, especialmente as cinzas leves e pesadas.

---

<sup>1</sup> Massa unitária é a relação entre a massa de um material granular e seu volume compreendendo o volume aparente e o volume de vazios intergranulares.

A variabilidade que há no processo de geração desses subprodutos depende: das características do carvão; da composição granulométrica do carvão moído e das condições de combustão que são afetadas pela variação da demanda de energia a ser gerada (Neville, 1997); do tipo de caldeira; do tempo de permanência; e da temperatura de queima (Cheriat *et al.*, 1999).

Essa variabilidade afeta as características finais da cinza, como o teor da fase vítrea, o teor de material incombusto, a forma, o tamanho e a distribuição do tamanho das partículas, a presença de óxido de magnésio e de outros minerais e mesmo a variação da cor (Neville, 1997, p. 643).

### **1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA**

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Comparar o desempenho de argamassas mistas para revestimento de paredes e tetos de uso corrente na construção civil com argamassas de mesmo traço, mediante substituições de cimento Portland por cinza leve e de areia por cinza pesada, provenientes da combustão de carvão mineral pulverizado, avaliando-se os fatores que intervêm nas propriedades das argamassas e permitindo uma melhor otimização na dosagem.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Adequar uma apropriada granulometria entre cinza pesada e areia; estudar a influência em argamassas das substituições de cimento Portland por cinza leve e de areia por cinza pesada, com diferentes percentuais, analisando-se as propriedades nos estados fresco e endurecido.

a) Comportamento no estado fresco:

- avaliar a demanda de água das argamassas confeccionadas com diferentes teores de cinzas;



- avaliar a influência do uso das cinzas na capacidade de retenção de água das argamassas confeccionadas;
- verificar a influência dos teores de substituição das cinzas na massa específica e no teor de ar incorporado dessas argamassas;
- verificar a influência dos teores de substituições das cinzas no tempo de pega das argamassas estudadas;
- avaliar a capacidade de exsudação de água das argamassas confeccionadas com diferentes teores de cinzas.

b) Comportamento no estado endurecido:

- analisar o desenvolvimento de resistência à compressão ao longo do tempo nas argamassas confeccionadas com diferentes teores de cinza pesada e cinza leve;
- verificar a influência dos teores de cinzas na capacidade de aderência ao substrato;
- relacionar o índice de vazios e de massa específica com os resultados de resistência à compressão;
- analisar a influência das substituições das cinzas na capacidade de absorção de água das argamassas.

c) Avaliar a relação entre as características químicas e físicas das cinzas e a evolução das principais reações químicas de endurecimento da argamassa.

Espera-se ainda propor uma alternativa para uso dos resíduos da combustão de carvão mineral pulverizado, contribuindo para evolução da pesquisa nas áreas da construção civil e do meio ambiente.

## **1.4 HIPÓTESES**

### **1.4.1 HIPÓTESE GERAL**

Existe viabilidade técnica para produção de argamassas com cinzas de carvão mineral em aplicações como material pozolânico e como agregado miúdo.

### **1.4.2 HIPÓTESES SUBJACENTES**

- As cinzas volantes possuem características químicas, físicas e minerais satisfatórias para uso em argamassas.
- As cinzas pesadas possuem efeito pozolânico quando usadas em argamassas com cal.
- Existe uma dosagem ótima a ser investigada para uso da cinza volante e cinza pesada em argamassas.
- Há uma influência positiva do aumento da massa unitária dos agregados da argamassa no desempenho desta..
- Existe uma relação ótima entre cimento, cinza leve, cinza pesada e cal hidratada, que atende aos requisitos físicos e mecânicos aliados à economia de custo.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos.

O capítulo 1 compreende a introdução do trabalho de pesquisa, na qual é apresentada uma visão geral do assunto com sua importância, seus objetivos, hipóteses e delimitações da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica referente às argamassas e aos materiais que as compõem, apresentando as propriedades, as exigências quanto à qualidade, os principais métodos de ensaio e de qualificação, como também as propriedades das cinzas do carvão mineral.

O capítulo 3 apresenta o programa experimental desenvolvido, detalhando os materiais empregados e os ensaios realizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados do programa experimental e as análises dos dados.

No capítulo 5 é apresentada uma análise geral dos resultados obtidos e as conclusões e recomendações do trabalho.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do trabalho e nas citações do texto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESGATE HISTÓRICO DA LINHA DE PESQUISA

As cinzas provenientes da combustão de carvão mineral pulverizado em centrais geradoras de energia termelétrica são utilizadas na construção civil desde a década de 40 do século passado, nos Estados Unidos (Pozzobon, 1999).

Malhotra e Mehta (1996) afirmaram que tipicamente a taxa das **[cinzas leves] : [cinzas pesadas]** geradas no processo de combustão do carvão mineral pulverizado é de **70 : 30**. Devido às características mineralógicas e granulométricas, a cinza leve não necessita de qualquer processo de beneficiamento antes de ser usada como adição mineral em materiais aglomerantes hidráulicos. Já a cinza pesada, por apresentar granulometria graúda, menor reatividade e, na maioria dos casos, estar em condição úmida, requer processo de beneficiamento.

Pozzobon (1999), na tabela 2.2 da página 18, cita que o uso das cinzas de carvão no mundo é de, em média, 30% em relação ao total gerado. Daí pode-se explicar o pequeno número de pesquisas que visam a valorização de cinza pesada para uso na construção civil.

Já a pesquisa da cinza volante é muito intensa, com seu uso já consagrado na fabricação de cimento Portland ou em adições em concreto, bem como na fabricação de artefatos de cimento; no entanto, o uso de cinza leve em argamassas com relação ao concreto e cimento é insignificante.

Ainda assim, o uso não atende à demanda da geração desse subproduto, que chega a 42% da cinza leve produzida, restando ainda quase 60%, que são dispostos em bacias de decantação e posteriormente em aterros.

No Brasil a geração importante de energia termelétrica é restrita à Região Sul, onde se encontram as principais jazidas de carvão mineral.

As pesquisas sobre o uso dessas cinzas em nosso país, também se concentram na cinza leve, sendo que a cinza pesada possui menor índice de investigação científica. Restringe-se ainda mais se forem consideradas apenas as linhas de pesquisas com argamassas.

Piazza e Rui (1999) estudaram argamassas contendo cinzas pesadas e leves da Termelétrica de Charqueadas, no Estado do Rio Grande do Sul, em substituição total à areia (cinza pesada) e substituição parcial da cinza pesada por cinza leve. Nessa análise, consideraram propriedades de resistência à compressão e à tração por flexão, variação dimensional e densidade, além da comparação entre cura sob água e ar.

As conclusões do estudo<sup>1</sup> destes autores mostraram o potencial de uso da cinza pesada na confecção de argamassas.

## **2.2 REVESTIMENTOS EM ARGAMASSAS**

A argamassa a ser produzida para qualquer finalidade requer uma série de requisitos para que sua função seja adequadamente exercida.

Na prática, observa-se que a dosagem da argamassa é feita de forma empírica e com características que atendam essencialmente à trabalhabilidade<sup>2</sup>, deixando de lado os requisitos que a argamassa deverá cumprir no estado endurecido.

---

<sup>1</sup> As conclusões podem ser vistas na página 20.

<sup>2</sup> É a propriedade da argamassa que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade.

Essa característica da realidade atual é consequência de vários fatores, entre os quais se pode citar a falta de normalização que oriente todos os segmentos, desde o profissional de projeto e execução até os fornecedores dos materiais, e o baixo volume de pesquisa que fixe parâmetros para os requisitos dos revestimentos de paredes.

A NBR 7200 (1982) – Revestimento de Paredes e Tetos com Argamassas - Materiais, Preparo, Aplicação e Manutenção – é genérica, sugere traços independente da granulometria, fixa a dimensão máxima do agregado para algumas aplicações, define alguns tipos de revestimento quanto à sua função como revestimento (especial) hidrófugo, ou seja, "aquele que pelo tipo dos seus componentes impede a entrada de umidade de precipitações pluviais, mas não dificulta a difusão do vapor d'água" e fixa limites para materiais pulverulentos de origem argilosa, em 5% em massa, mas os requisitos e critérios de desempenho das argamassas não são abordados.

A norma ISO 6240 (1980) define desempenho como "o comportamento de um produto em relação ao seu uso".

A NBR 7200 (1982), que trata sobre revestimentos de paredes e tetos com argamassas, define revestimento externo como sendo aquele que deve ser resistente às intempéries (geada, oscilações de temperatura, teor de umidade, etc.). Quanto ao grau de permeabilidade ao vapor de água, o revestimento usado externamente e o material de construção das paredes devem ser compatíveis.

Atualmente a tecnologia dos materiais de construção permite fixar parâmetros ou critérios de avaliação que atendam aos requisitos do revestimento externo de paredes.

A grande parte da bibliografia existente fixa as características da argamassa em função dos materiais que serão empregados na mistura e, principalmente, em função das características de trabalhabilidade exigíveis para aplicação da argamassa sobre o substrato. Assim, observa-se uma tendência em se caracterizar a argamassa baseada essencialmente nos requisitos quanto à aplicabilidade, que é uma fase importante, porém não é a única. Os requisitos de uma argamassa envolvem um espectro ainda maior, isto é, esses requisitos devem ser supridos levando-se em conta as características necessárias no estado fresco, que permitirá uma trabalhabilidade adequada, e

principalmente os requisitos de desempenho, como os apresentados por Polisseni (1986) *apud* Cincotto *et al.* (1995):

- i) apresentar estabilidade mecânica quando solicitada por carregamento normal ou sofrer deformação imposta por fenômenos térmicos ou climáticos;
- ii) apresentar segurança em caso de incêndio, sismo ou outras solicitações excepcionais;
- iii) apresentar estanqueidade à água;
- iv) contribuir para a satisfação das exigências higrotérmicas e acústicas do usuário;
- v) contribuir para a estética da edificação.

Constata-se que o desempenho do revestimento está intrinsecamente ligado ao desempenho e às características da parede ou suporte, podendo ser citado o tipo de componentes de vedação (ex.: tijolos ou blocos), quais materiais são constituídos (ex.: cerâmica vermelha ou concreto) e a espessura da parede.

Outro fator fundamental que deverá ser levado em consideração na hora de se especificar a argamassa é a condição de exposição a que a parede ficará sujeita.

Os requisitos de desempenho são qualitativamente definidos, a partir da função específica que o elemento ou o componente ocupa na edificação (Helene, 1988).

Dessa forma, Parois (1978) *apud* Cincotto *et al.* (1995) define as funções do revestimento:

- i) segurança;
- ii) habitabilidade;
- iii) compatibilidade com a base;
- iv) compatibilidade entre materiais.

A tabela 2.1 relaciona os requisitos básicos com as propriedades do conjunto **argamassa+base**. No entanto, os parâmetros ou limites para cada uma dessas propriedades não foram definidos na bibliografia consultada.

Cabe observar que o requisito conforto visual é quantificado/avaliado pelo desempenho alcançado nas propriedades de resistência à compressão, abrasão, tração e durabilidade, portanto, é uma função de avaliação indireta.

Tabela 2.1 – Função do revestimento *versus* propriedade da argamassa e do conjunto (Adaptado de CINCOTTO *et al.*, 1995)

| Requisitos Básicos              | Propriedades ou Característica  |   |
|---------------------------------|---|---|
|                                 | Argamassa   | Revestimento e Base   |
| Segurança                       | <ul style="list-style-type: none"><li>– Resistência à compressão</li><li>– Resistência ao desgaste superficial - abrasão</li><li>– Resistência à tração</li><li>– Coeficiente de deformação</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>– Aderência</li><li>– Resistência ao impacto</li><li>– Resistência ao fogo</li></ul>  |
| Habitabilidade                  | <ul style="list-style-type: none"><li>– Estanqueidade à água</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>– Isolamento térmico</li><li>– Isolamento acústico</li><li>– Permeabilidade</li></ul> |
| Compatibilidade com a base      | <ul style="list-style-type: none"><li>– Consistência (coesão, tixotropia, viscosidade)</li><li>– Retenção de consistência</li><li>– Plasticidade (limite de escoamento e coesão)</li><li>– Adesão inicial</li><li>– Retenção de água</li><li>– Massa específica e ar incorporado.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Índice de sucção</li><li>– Retração</li></ul>                                       |
| Compatibilidade entre materiais |   | Durabilidade  |

2.3 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo desempenha as funções de reduzir o custo das argamassas, por ser um material mais barato que a pasta de aglomerante, e reduzir a retração da argamassa devido ao menor volume de pasta na argamassa.

Por tudo isso, a função benéfica do agregado na argamassa é indiscutível, porém as características desses agregados influem, para mais ou para menos, no desempenho dessas argamassas.

A forma do grão influencia a trabalhabilidade e conseqüentemente o consumo de água, aglomerantes e custo, mas a discussão está em qual parâmetro adotar na escolha de um agregado que tenha uma correlação linear importante com o desempenho da argamassa.

Sabbatini (1986) citou que a areia que apresenta melhor potencial de produzir uma argamassa adequada é a que tem granulometria contínua (corrida) e classificada como



média (módulo de finura<sup>1</sup>, entre 1,8 e 2,8) e que tenha predominância de grãos arredondados.

Tristão *et al.* (1995) alerta que, caso seja adotado somente o módulo de finura da areia para classificá-la sem considerar a composição granulométrica, pode-se incorrer em erros, já que para um mesmo módulo de finura pode-se encontrar composições granulométricas diferentes. Segundo o autor, existe uma correlação linear importante entre a resistência à compressão das argamassas e os coeficientes de uniformidade com o módulo de finura dos agregados que as compõem, conforme apresenta a figura 2.1.

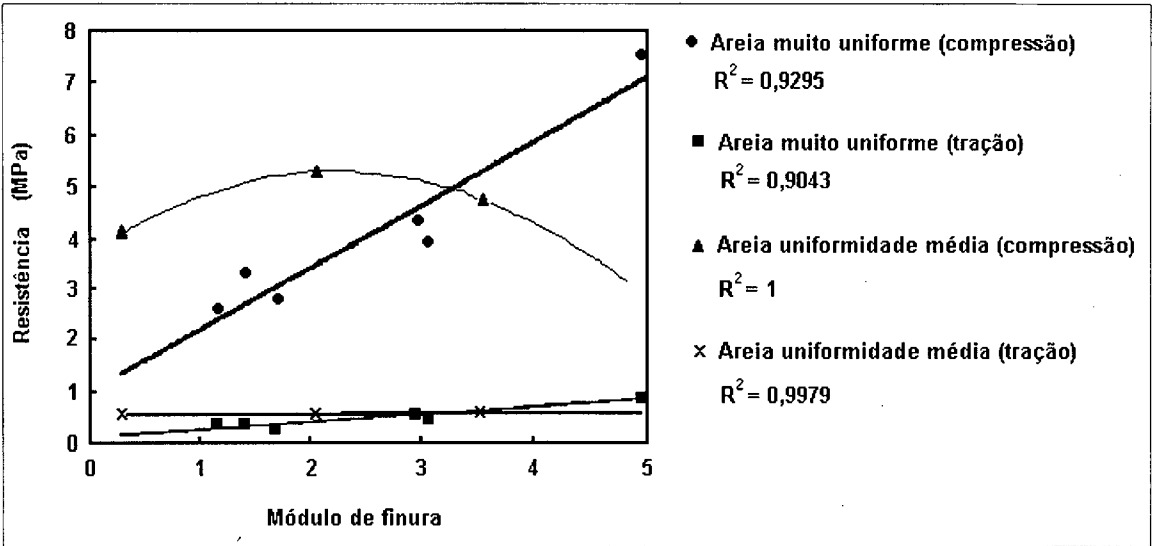


Figura 2.1 - Resistência à compressão e à tração aos 28 dias de idade em função do módulo de finura para as areias classificadas pelo coeficiente de uniformidade (Tristão, 1995).

Carneiro *et al.* (1997) complementam que a distribuição granulométrica, o módulo de finura e o coeficiente de uniformidade desconsideram a forma do grão que influencia sobremaneira o grau de empacotamento dos grãos. Estes autores concluíram que a massa unitária da areia é um parâmetro relevante no estudo do desempenho das argamassas, pois integra a um só tempo a distribuição granulométrica, a forma dos grãos e a capacidade de empacotamento. Na figura 2.2, os autores comparam o desempenho da resistência à compressão em função da massa unitária.

<sup>1</sup> Módulo de finura (MF) é o valor da soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal (# 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), dividido por 100.

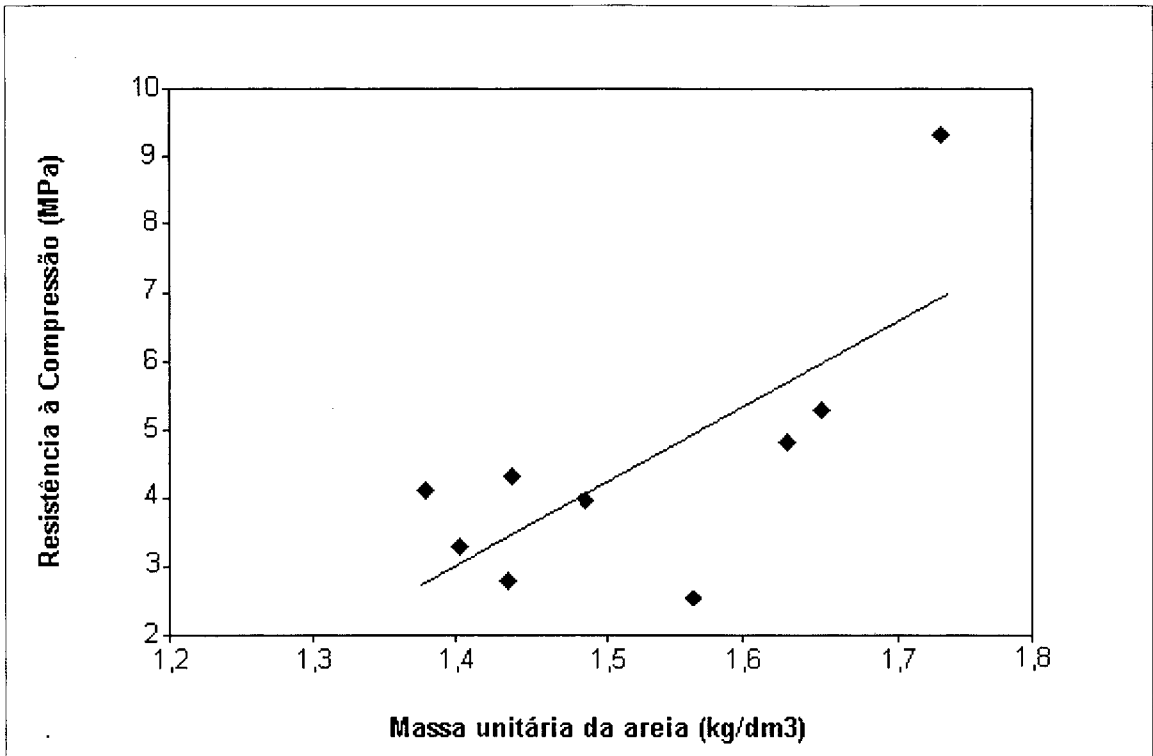


Figura 2.2 - Influência da massa unitária da areia na resistência à compressão das argamassas (Carneiro *et al.*, 1997).

## 2.4 CINZAS DE CARVÃO MINERAL PULVERIZADO

As cinzas de carvão mineral são subprodutos originados da combustão de carvão mineral. O setor responsável pela produção mais importante de cinzas no mundo é o da geração de energia elétrica.

Malhotra e Mehta (1996) comentam que o carvão mineral é constituído principalmente por carbono, hidrogênio e oxigênio, e por nitrogênio e enxofre em menor escala. Além disso, dependendo do grau calorífico do carvão, quantias substanciais de impurezas incombustíveis, entre 10 e 40%, estão usualmente presentes em forma de argila, xisto, quartzo, feldspato e rocha calcária.

Com o propósito de se obter um melhor desempenho na queima do carvão, a maioria das usinas termelétricas o moem a uma finura em que 75% em massa passa na peneira 0,075 mm.

O carvão moído é então pulverizado no interior da caldeira, passando por várias zonas de temperatura em que a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto que as impurezas minerais são fundidas e permanecem em suspensão nos gases da combustão.

Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundidas são resfriadas rapidamente (de 1500°C para 200°C em poucos segundos), solidificando-se como partículas esféricas vítreas. Algumas dessas partículas se aglomeram para formar as cinzas pesadas (*bottom ash*) que caem no fundo da caldeira e são recolhidas por esteiras rolantes, enquanto que as demais voam com o fluxo do gás da combustão, chamadas cinzas volantes (*fly ash*), e são em grande parte capturadas por uma série de separadores mecânicos e precipitadores eletrostáticos ou filtros.

Zwonok *et al.* (1996) *apud* Pozzobon (1999) mostram uma tabela (tabela 2.2) comparativa do uso desses subprodutos nos diversos continentes, onde se constata que o potencial de crescimento do uso é muito significativo, em média apenas 30% do total desses resíduos (escórias, cinzas leves e pesadas e produtos da dessulfurização) são utilizadas, sendo que as quantias relativas dependem da tecnologia de combustão envolvida.

**Tabela 2.2 - Usos percentuais aproximados dos resíduos da combustão de carvão (Pozzobon, 1999)**

| <b>Continente</b> | <b>Porcentagem de uso</b> |
|-------------------|---------------------------|
| Europa            | 42,50                     |
| Ásia              | 30,00                     |
| América           | 27,50                     |
| África            | 19,00                     |
| Oceania           | 10,50                     |

**2.4.1 CINZA VOLANTE**

Na geração termelétrica, a cinza volante é um subproduto da combustão de carvão utilizado na geração de energia elétrica e não um produto fabricado especialmente para atender a certas características que influenciam positivamente o desempenho de concretos e argamassas; por essa razão, a cinza volante apresenta uma variabilidade significativa em suas propriedades e características físico-químicas, que podem trazer como resultado da adição em concretos e argamassas características diferentes daquelas esperadas.

Sobre isso, Neville (1997) cita, "não deve surpreender o fato de que o uso de cinza volante pode resultar efeitos muito diversos, especialmente porque seu teor no concreto pode variar muito". Mais à frente, complementa: "O que não é possível é dar

informações sobre uma cinza volante "padrão", ou mesmo típica. Em consequência não se pode apresentar uma diretriz específica para uso de cinza volante como um material genérico".

Dependendo das características mineralógicas das cinzas leves e do carvão que as deu origem, são classificadas em dois grupos: as que possuem um alto teor de cálcio e as que possuem baixo teor de cálcio.

Mehta e Monteiro (1994) citam que a cinza com baixos teores de cálcio ( $< 10\%$  de CaO total) geralmente é produto da combustão de antracito e de carvões betuminosos. Já a cinza com altos teores de cálcio (normalmente entre 15 e 30% de CaO total) é geralmente um produto de combustão de lignito e de carvões sub-betuminosos. Em geral, as cinzas com alto teor de cálcio são mais reativas porque contêm a maior parte do cálcio na forma de compostos cristalinos reativos, e também há evidência de que o principal constituinte (fase não cristalina) contém íons de cálcio suficientes para aumentar a reatividade do vidro de aluminossilicato.

Atualmente, devido à grande disponibilidade de cinza volante em todo o mundo, essa pozolana artificial é empregada em maior quantidade na fabricação de cimento Portland composto, como substituição parcial ao clínquer, e na produção de concretos e argamassas, como substituição parcial ao cimento. Por esse motivo, diversos trabalhos foram publicados sobre o uso das cinzas volantes na construção civil, sendo também tema em diferentes congressos nacionais e internacionais.

#### **2.4.2 CINZA PESADA**

Em 1998, conforme Pozzobon (1999), somente 30,2% das cinzas geradas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda foram comercializadas. A cinza pesada gerada nesse Complexo não foi comercializada. A cinza leve não comercializada é umedecida e armazenada temporariamente junto com a cinza pesada em bacias de decantação, até que seja esgotada a capacidade de estocagem dessas bacias, quando essas cinzas são retiradas e depositadas em aterros especiais permanentes. A autora ainda cita trecho de entrevista declarada: ..."A cinza úmida possui muita matéria orgânica agregada na bacia de sedimentação".

Cheriaf *et al.* (1999) comentam que a utilização potencial da cinza pesada é determinada por suas características físicas, como distribuição do tamanho dos grãos, expansibilidade e cor. A textura normalmente grossa, fundida e vítrea da cinza pesada faz dela uma substituta ideal para os agregados naturais.

Avaliando as características da cinza pesada gerada no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Cheriaf *et al.* (1999) concluíram que:

- i) essa cinza, muito pobre em CaO (0,8%), apresenta uma certa similaridade com a cinza tipo F (conforme classificação da ASTM);
- ii) a atividade pozolânica da cinza pesada com cal é muito baixa até o 14º dia de hidratação. A atividade pozolânica inicia aos 28 dias, e o consumo de hidróxido de cálcio é muito importante aos 90 dias;
- iii) o índice de atividade com cimento Portland determinado com argamassa, de acordo com a norma européia ENV450, alcançou 0,88 aos 28 dias e 0,97 aos 90 dias. Tais valores permitem o uso de cinza pesada em concreto;
- iv) uma adequada moagem melhora a atividade pozolânica da cinza pesada. O desempenho de preenchimento da cinza pesada moída também é interessante, e o índice de resistência da cinza no 28º dia é aumentado em 27% quando ela é moída em moinho de bolas por 6 horas, em laboratório.

Piazza e Rui (1999), pesquisando a substituição total de areia quartzosa por cinza pesada proveniente da termelétrica de Charqueadas, Estado do Rio Grande do Sul, em argamassa de cimento, obtiveram as seguintes conclusões:

- i) as cinzas pesadas apresentam características físicas bastante distintas das cinzas leves e composição química similar;
- ii) os resultados dos estudos realizados indicam a possibilidade de utilização das cinzas pesadas em substituição à areia quartzosa em argamassas e a obtenção de materiais construtivos;
- iii) a substituição de parte das cinzas pesadas por cinzas leves melhora as propriedades mecânicas das argamassas, sendo que a performance está diretamente relacionada com o percentual de substituição dentro do intervalo estudado;
- iv) a cura ao ar não exerce efeitos negativos sobre as propriedades mecânicas dos produtos contendo cinzas pesadas, podendo ser dispensada, por essa razão, a cura sob água;
- v) as cinzas pesadas possuem, como as cinzas leves, atividade pozolânica.

Estes mesmos autores citam: "Enquanto que as cinzas leves têm sido objeto de vários estudos e encontram seu aproveitamento parcial principalmente como pozolana, na

produção do cimento pozolânico e no concreto (Albrecht e Pollmann, 1980; Braun e Gebauer, 1983; Cain, 1981; Crow e Dunstan, 1981; Gobetti, 1969; Manz, 1993 e Piazza, 1994), as cinzas pesadas não foram praticamente estudadas e seu aproveitamento é bastante restrito".

## 2.5 A ESCOLHA DO TRAÇO-BASE

A NBR 7200 (1982) sugere o traço em volume **1 : 2 : 9** a **11** (cimento : cal hidratada : areia) para as argamassas do grupo II (cimento e cal) como revestimento de paredes internas e externas e tetos.

Segundo a NBR 8214, as argamassas de emboço podem ter o traço variando de **1 : 1 : 6** a **1 : 2 : 9**, em volume (cimento : cal : areia).

A norma ASTM C 270-82 (Mortar for unit masonry) especifica que, para as argamassas de cimento e cal, o agregado medido úmido e solto não deve ter volume menor do que 2,25 vezes nem maior do que três vezes a soma, em separado, dos volumes dos aglomerantes.

Cincotto *et al.* (1995) citam que, em publicações nacionais, o uso e estudo do traço **1 : 2 : 9** (cimento : cal hidratada : areia) em volume, para revestimentos de paredes externas, emboço e reboco é corrente. Entretanto, no Brasil, a variabilidade apresenta-se de forma bastante intensa.

Ainda estes autores comentam que os traços mais utilizados são: **1 : 1 : 3**; **1 : 1 : 5,5**; **1 : 3 : 7**; **1 : 2 : 9**; e **1 : 2 : 11** (cimento Portland, cal e areia).

Autores como Berto (1988), Mibielli (1994), Tristão (1995), Yoshida e Barros (1995), Gomes *et al.* (1995), Siqueira *et al.* (1995), Campiteli *et al.* (1995), Carvalho e Cavalcanti Jr (1997) e Calhau *et al.* (1999) usaram o traço **1 : 2 : 9** (cimento Portland, cal e areia) em suas pesquisas com argamassas de revestimento.

Embora o traço da argamassa não seja o objetivo principal desta pesquisa, buscou-se um traço que fosse de uso consagrado, para poder observar melhor o desempenho dessa argamassa com as substituições utilizadas.

Numa analogia ao concreto, Neville (1997) discorrendo sobre a teoria da máxima massa unitária dos agregados, comenta que se passou a defender curvas granulométricas com forma parabólica, ou em parte parabólica e depois retilínea, quando representadas em escala linear natural, como mostrado na figura 2.3.

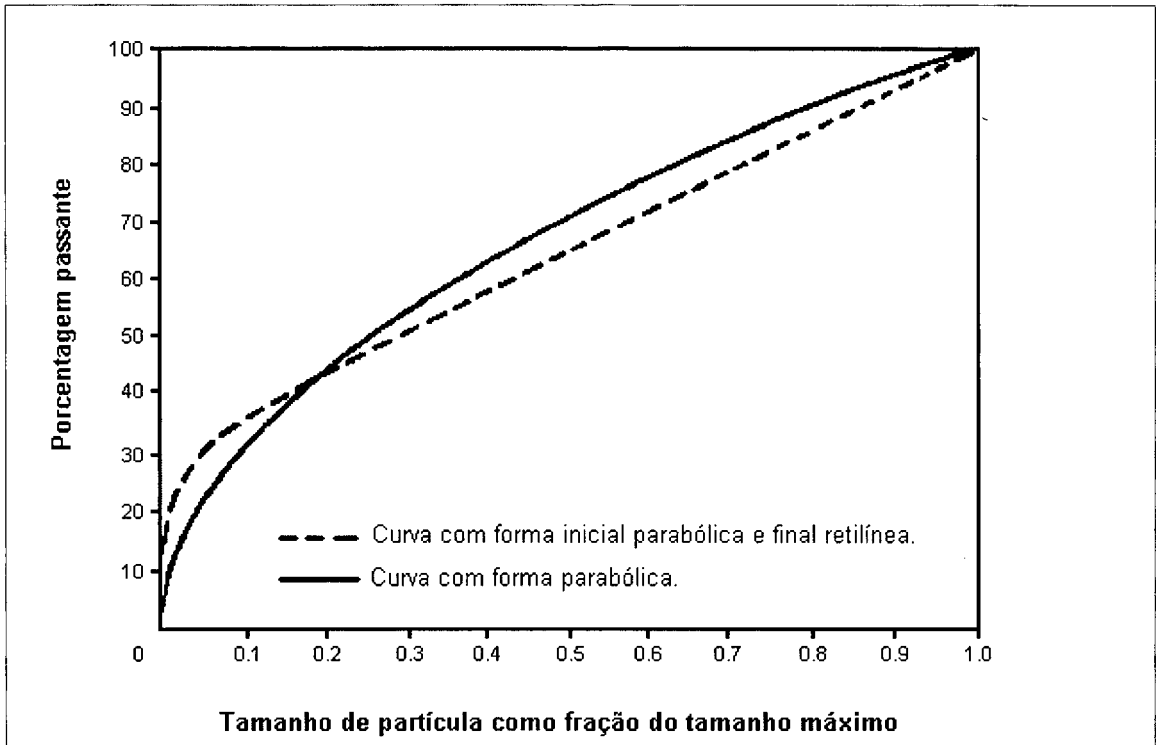


Figura 2.3 - Curvas granulométricas de Fuller (Neville, 1997).

## 2.6 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

### 2.6.1 TEOR DE ÁGUA

Na prática dos canteiros de obra, as argamassas são dosadas conforme a necessidade do pedreiro em manuseá-la e aplicá-la. Por isso, a importância em se definir quais são as propriedades no estado fresco que melhor reflitam as necessidades de operação.

Ryder (1963) *apud* Cincotto, Silva e Carasek (1995), ao estudar as argamassas de revestimento, classificou suas propriedades em três tipos, para avaliação do desempenho:

- i) Todas as propriedades da argamassa em seu estado plástico, que afetam a facilidade de aplicação por parte do operário.

- ii) As propriedades da argamassa endurecida, como resistência e elasticidade, as quais podem ser avaliadas por ensaios em corpos-de-prova de argamassa.
- iii) As propriedades da argamassa relacionadas ao componente da base e que não podem ser determinadas independentemente deste.

Pode-se inferir que as propriedades do primeiro tipo são as traduzidas pela propriedade qualitativa da trabalhabilidade.

Conforme Rago e Cincotto (1997), a consistência e a plasticidade são consideradas como sendo as principais propriedades capazes de expressar a trabalhabilidade das argamassas. Porém, não medem e sim avaliam essa trabalhabilidade, não podendo seus resultados serem absolutos, mas como valores singulares, apenas comparativos.

Em argamassas sem aditivos, que são as argamassas deste estudo, o principal fator que determina a consistência é o teor de água.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a consistência, de maneira ampla, é a medida da umidade do concreto; "...é diretamente proporcional ao consumo de água para um certo conjunto de materiais".

Neville (1997) afirma que o principal fator que influencia a trabalhabilidade é o teor de água da mistura.

Cincotto, Silva e Carasek (1995) comentam que a consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: **(i)** relação água/aglomerante; **(ii)** relação aglomerante/areia; **(iii)** granulometria da areia e **(iv)** natureza e qualidade do aglomerante.

Autores como Calmon *et al.* (1997), Carvalho e Cavalcanti Jr (1997), Müller (1999) e Falcão Bauer e Rago (1999), entre outros, adotaram o teor de água fixado pela norma NBR 13276 (1995) – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão<sup>1</sup> – para conduzi-rem seus experimentos.

---

<sup>1</sup> 255±10mm medidos na mesa de fluidez, que corresponde a deformação da amostra da argamassa após a absorção de energia constante (30 quedas de 14mm).



2.6.2 TEOR DE AR INCORPORADO

A norma ASTM C270-82 fixa em 12% o teor máximo admissível de ar incorporado em argamassas de cimento e cal.

Cavani *et al.* (1997), avaliando a influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas, concluíram que a fixação de determinado índice de consistência-padrão para a trabalhabilidade ótima, desvinculado do teor de ar incorporado, é inadequada, conforme mostra a figura 2.4. O estudo contemplou a comparação entre a consistência medida na mesa de consistência e o teor de ar incorporado de argamassas com mesma trabalhabilidade qualitativa, isto é, os autores desenvolveram uma escala empírica de trabalhabilidade, levando em consideração a coesão, o esforço no manuseio, o comportamento por ocasião da aplicação em uma superfície vertical, incluindo reflexão, deslizamento e adesividade, com o objetivo de manter constante essa trabalhabilidade para comparar a consistência e o teor de ar incorporado.

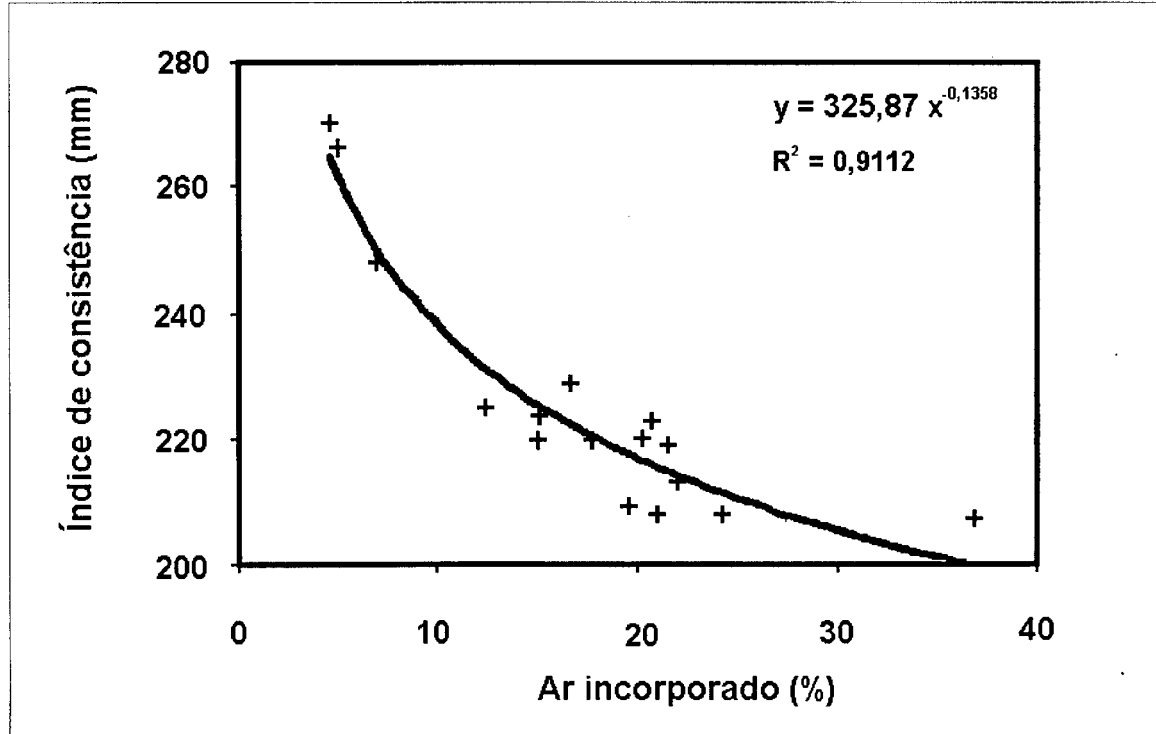


Figura 2.4 - Índice de consistência para argamassas com índice 0 de trabalhabilidade (mesma trabalhabilidade qualitativa) em função do teor de ar incorporado (Cavani *et al.*, 1997).

Carette e Malhotra (1984) *apud* Malhotra e Mehta (1996), investigando a substituição de cinza leve (tipo ASTM Classe C e F) em concretos, observaram que, enquanto para a mistura de controle o ar incorporado era de 170 ml/m<sup>3</sup>, no concreto com 60% de cinza leve esse índice subiu para 690 ml/m<sup>3</sup>. Concluíram que esse é um caso extremo, pois, em geral, o aumento do ar incorporado é consideravelmente baixo, conforme tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Proporções das misturas de concreto com incorporação de cinzas leve canadenses (Carette e Malhotra, 1984 *apud* Malhotra e Mehta, 1996)**

| Identificação                                   | Quantidade (kg/m3) |            |           |        | Ar incorporado (ml/m3) | Relação a/(cim + cinza leve) * | Percentual de substituição de cimento por cinza leve, em massa (%) |
|---|--------------------|------------|-----------|--------|------------------------|--------------------------------|--|
|   | Cimento            | Cinza leve | Agregados |        |                        |                                |  |
|   |                    |            | Miúdo     | Graúdo |                        |                                |  |
| Controle  | 295                | 0          | 782       | 1082   | 170                    | 0.50                           | 0  |
| F1  | 236                | 59         | 780       | 1077   | 320                    | 0.50                           | 20   |
| F2  | 237                | 59         | 782       | 1080   | 200                    | 0.50                           | 20   |
| F3  | 237                | 59         | 786       | 1088   | 200                    | 0.50                           | 20   |
| F4  | 238                | 59         | 792       | 1094   | 160                    | 0.50                           | 20   |
| F5  | 237                | 59         | 782       | 1080   | 690                    | 0.50                           | 20   |
| F6  | 238                | 59         | 784       | 1082   | 660                    | 0.50                           | 20   |
| F7  | 239                | 59         | 780       | 1077   | 370                    | 0.50                           | 20   |
| F8  | 236                | 59         | 775       | 1069   | 230                    | 0.50                           | 20   |
| F9  | 236                | 59         | 775       | 1070   | 240                    | 0.50                           | 20   |
| F10   | 237                | 59         | 781       | 1079   | 290                    | 0.50                           | 20   |
| F11   | 237                | 59         | 782       | 1080   | 150                    | 0.50                           | 20   |
| * Relação água/ (cimento + cinza leve) em massa |                    |            |           |        |                        |                                |  |

2.6.3 RETENÇÃO DE ÁGUA

Cincotto, Silva e Carasek (1995) apresentaram razões para que a capacidade de retenção de água seja considerada na qualificação das argamassas, a saber:

- i) Manutenção das condições favoráveis de hidratação do cimento e a carbonatação da cal.
- ii) Manutenção da consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água (evaporação, sucção, absorção pelo componente).
- iii) Disponibilidade de tempo para o pedreiro aplicar, regularizar e desempenar a camada de revestimento.
- iv) Manutenção das condições ótimas de contato da argamassa com a base.
- v) Capacidade de retenção de umidade no estado endurecido.

Pode-se dizer que a capacidade de retenção de água é importante para garantir a presença de água na argamassa e, conseqüentemente, permitir as reações de hidratação dos materiais cimentantes e pozolânicos.

Sabbatini (1984) comenta que a capacidade de retenção de água da argamassa varia em função do potencial de absorção da base onde esta se encontra aplicada, conforme ilustra a figura 2.5.

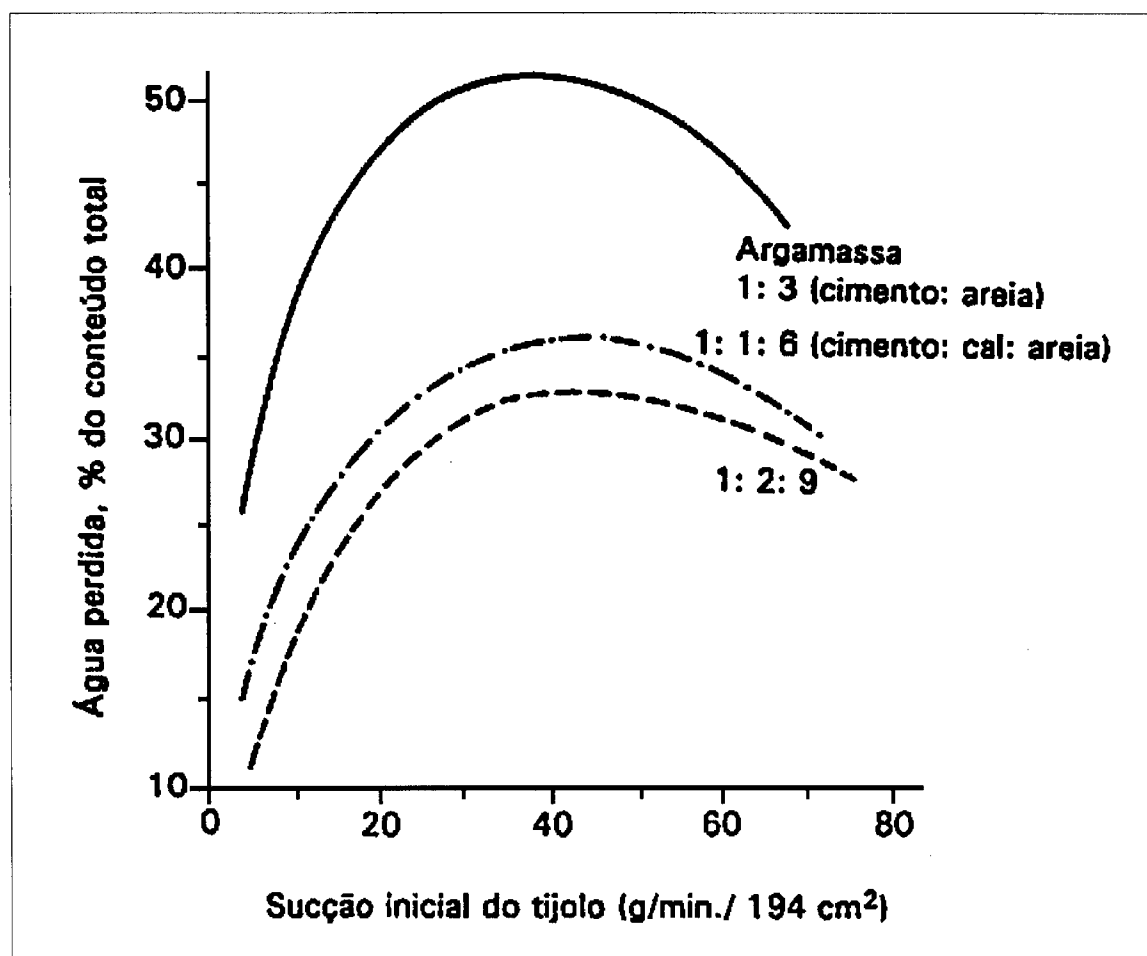


Figura 2.5 - Perda de água de argamassas em função do tijolo (g/min./194 cm<sup>2</sup>) (Sabbatini, 1984).

Selmo (1989) afirma que os fatores que influem sobre a capacidade de retenção de água das argamassas são:

- i) a área específica dos materiais constituintes e o número de íons ativos por unidade de superfície;
- ii) a maturação prévia das argamassas de cal (período em que a pasta ou argamassa de cal são deixadas em descanso antes da aplicação);
- iii) a natureza da cal;

- iv) a relação cal/cimento do traço;
- v) a relação agregado/aglomerante do traço.

Carvalho e Cavalcanti Jr (1997), avaliando a substituição de areia por "arenoso", adição areno-argilosa do Estado do Sergipe, concluíram que houve um aumento da retenção de água das argamassas com substituição de areia acima de 70%. Na tabela 2.4 são apresentados os resultados.

Tabela 2.4 - Propriedades das argamassas no estado fresco, com substituição de areia por "arenoso" (Carvalho e Cavalcanti Jr, 1997)

| Argamassa    | Densidade de massa (g/cm3) | Consistência (mm) | Teor de ar incorporado (%) | Retenção de água (%) |
|--------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|
| Referência   | 2,09                       | 259               | 4                          | 64                   |
| 10% arenoso  | 1,95                       | 263               | 7                          | 41                   |
| 20% arenoso  | 1,95                       | 264               | 8                          | 45                   |
| 40% arenoso  | 1,98                       | 263               | 8                          | 51                   |
| 70% arenoso  | 1,99                       | 265               | 8                          | 78                   |
| 100% arenoso | 2,16                       | 265               | 6                          | 89                   |
| Metodologia  | NBR 13278                  | NBR 13276         | NBR 13278                  | NBR 13277            |

O aumento da retenção pode ter sido devido ao aumento significativo da área específica dos agregados no momento da substituição da areia pelo "arenoso", cujo resultado de análise granulométrica encontra-se na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Análise granulométrica da areia e "arenoso" (adaptado de Carvalho e Cavalcante Jr, 1997)

| Areia        |          |                    | "Arenoso"    |          |                    |
|--------------|----------|--------------------|--------------|----------|--------------------|
| Peneira (mm) | % retida | % retida acumulada | Peneira (mm) | % retida | % retida acumulada |
| -            | -        | -                  | 4,80         | 0,30     | 0                  |
| 2,40         | 0        | 0                  | 2,40         | 3,60     | 4                  |
| 1,20         | 0,10     | 0                  | 1,20         | 8,20     | 12                 |
| 0,60         | 1,50     | 2                  | 0,60         | 14,40    | 26                 |
| 0,30         | 12,50    | 14                 | 0,30         | 18,10    | 45                 |
| 0,15         | 51,00    | 65                 | 0,15         | 31,60    | 76                 |
| <0,15        | 34,90    | 100                | 0,075        | 4,00     | 80                 |
| -            | -        | -                  | 0,050        | 3,00     | 83                 |
| -            | -        | -                  | 0,005        | 11,00    | 94                 |

A norma ASTM C270-82 fixa limite mínimo para retenção de água em argamassas de cimento e cal em 75%. Ressalta-se que a ABNT não fixa os valores mínimos a serem atendidos. Na Bibliografia Nacional, alguns autores consideram 80% como um valor bom para a capacidade de retenção de água, baseando-se na experiência de laboratório e nas observações em canteiro de obra.

2.6.4 EXSUDAÇÃO

Calmon *et al.* (1997) compararam os resultados de retenção de água e exsudação das argamassas no estudo de substituição de areia por pó de granito e concluíram que houve redução da retenção de água das argamassas com o aumento do teor de substituição, da mesma forma que houve maior exsudação, conforme tabela 2.6 .

Tabela 2.6 - Resultados dos ensaios de argamassas no estado fresco, com substituição da cal por pó de granito (Calmon *et al.*, 1997)

| Traço em volume | Percentual de substituição | Consistência (mm) | Retenção de água (%) | Massa específica (kg/dm3) | Exsudação (g) |        |        |         |
|-----------------|----------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|---------------|--------|--------|---------|
|                 |                            |                   |                      |                           | 15 min        | 30 min | 60 min | 120 min |
| 1 : 2 : 8       | Referência:                | 248,5             | 93,90                | 2,025                     | 0,3           | 1,0    | 1,8    | 0,5     |
|                 | 25%                        | 247,0             | 91,57                | 2,093                     | 0,6           | 1,4    | 2,8    | 2,4     |
|                 | 50%                        | 247,5             | 92,23                | 2,100                     | 0,8           | 1,3    | 2,8    | 2,3     |
|                 | 75%                        | 249,0             | 91,21                | 2,108                     | 1,1           | 2,5    | 5,0    | 4,9     |
|                 | 100%                       | 246,0             | 91,28                | 2,123                     | 0,9           | 1,9    | 2,1    | 1,6     |
| 1 : 1 : 6       | Referência:                | 245,0             | 92,11                | 2,070                     | 0,5           | 2,2    | 3,2    | 4,2     |
|                 | 25%                        | 254,0             | 89,90                | 2,095                     | 2,1           | 5,4    | 5,7    | 4,6     |
|                 | 50%                        | 247,5             | 87,18                | 2,100                     | 2,0           | 4,9    | 5,8    | 4,5     |
|                 | 75%                        | 264,5             | 88,01                | 2,100                     | 2,4           | 5,9    | 6,3    | 5,9     |
|                 | 100%                       | 251,5             | 89,05                | 2,123                     | 2,7           | 6,2    | 5,7    | 3,8     |

A cal utilizada foi a CH-I<sup>1</sup>, que atende ao limite de finura normalizado; o pó de granito possui 97,7% da massa passante na peneira 0,15 mm; 88,7% passante na peneira 0,075 mm e 73,9% passante na peneira 0,044 mm. Baseado nessas informações, o aumento da exsudação e a redução da retenção de água, à medida que se aumenta a substituição da cal por pó de granito, pode ser devido à menor superfície específica desses finos. Normalmente, o aumento da superfície específica reduz a exsudação e aumenta a retenção.

Ravina (1997), avaliando as propriedades do concreto fresco com alto volume de cinza volante (100 a 200 kg/m<sup>3</sup>) em substituição parcial à areia fina, concluiu que a exsudação do concreto com cinza volante era aproximadamente a mesma do concreto de referência (resultados na tabela 2.7). Este autor comenta o fato de haver opiniões diferentes, isto é, autores que obtêm resultados de redução da exsudação e outros que obtêm resultados de aumento da exsudação ..."aparentemente, são envolvidos efeitos mutuamente opostos:

<sup>1</sup> CH-I – Nomenclatura fixada pela NBR 7175, 1992, para classificar cal hidratada tipo I, que fixa limites físico-químicos. Esta cal do tipo I é a que possui os limites mais rígidos de qualidade.

de um lado a cinza leve aumenta os finos e reduz o teor de água para a mesma consistência, reduzindo a exsudação; por outro lado, ela aumenta a mobilidade da mistura e a dispersão das partículas de cimento e retarda a pega, aumentando a exsudação".

**Tabela 2.7 – Taxa máxima de exsudação, em kg/m<sup>2</sup>/h; quantia total em kg/m<sup>2</sup> e percentual, e duração de exsudação de concretos com e sem cinza leve (125 kg/m<sup>3</sup>) como substituição parcial de areia (Ravina, 1997)**

| Concreto       | Taxa máxima de exsudação (kg/m <sup>2</sup> /h) | Exsudação total (kg/m <sup>2</sup> ) | Exsudação total (%) | Duração de exsudação (min) |
|----------------|---|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Referência     | 1,33  | 2,58                                 | 7,25                | 160                        |
| Com cinza leve | 1,49  | 2,50                                 | 6,35                | 150                        |

### 2.6.5 TEMPO DE PEGA

Neville (1997) conceitua a pega em termos gerais como sendo o processo de mudança do estado fluido para o estado rígido.

O processo de pega reflete as mudanças graduais, a partir de uma mistura plástica até uma endurecida, e é o resultado do processo de hidratação cujas partículas sólidas separadas vão gradualmente se interconectando numa estrutura de rede (Ravina, 1997).

Malhotra e Mehta (1996) afirmam que parece haver um consenso geral na literatura publicada de que as cinzas leves com baixo teor de cálcio exercem influência retardadora nos tempos de pega.

**Tabela 2.8 - Tempos de pega de concretos com algumas cinzas leves canadenses incorporadas – (adaptado de Carette e Malhotra, 1984)**

| Mistura nº | Percentual de substituição do cimento por cinza leve (massa) | Fator água/ (cimento + cinza leve) (massa) | Tempos de pega (h:min) |       |       |
|------------|--|--|------------------------|-------|-------|
|            |  |  | Inicial                | Final | Total |
| Referência | 0  | 0,50                                       | 4:10                   | 6:00  | 1:50  |
| F1         | 20   | 0,50                                       | 4:50                   | 8:00  | 3:10  |
| F2         | 20   | 0,50                                       | 7:15                   | 10:15 | 3:00  |
| F3         | 20   | 0,50                                       | 5:20                   | 8:10  | 2:50  |
| F4         | 20   | 0,50                                       | 6:20                   | 8:25  | 2:05  |
| F5         | 20   | 0,50                                       | 5:15                   | 8:55  | 3:40  |
| F6         | 20   | 0,50                                       | 4:30                   | 6:50  | 2:20  |
| F7         | 20   | 0,50                                       | 4:15                   | 6:20  | 2:05  |
| F8         | 20   | 0,50                                       | 5:10                   | 7:30  | 2:20  |
| F9         | 20   | 0,50                                       | 5:25                   | 9:00  | 3:35  |
| F10        | 20   | 0,50                                       | 4:45                   | 7:00  | 2:15  |
| F11        | 20   | 0,50                                       | 4:00                   | 6:05  | 2:05  |

Carette e Malhotra (1984) em estudos de concretos com 11 tipos de cinzas leves, mostraram que dez aumentaram significativamente os tempos de pega inicial e final, conforme tabela 2.8.

#### **2.6.6 MASSA ESPECÍFICA**

A massa específica da argamassa no estado fresco caracteriza-se pela razão entre a massa da argamassa e o volume que ocupa, incluindo os vazios de ar aprisionado e ar incorporado, após a argamassa ter sido adensada.

Essa propriedade tem importância na determinação do teor de ar incorporado, além de permitir que se avalie a evolução das reações de hidratação, carbonatação e pozolânicas ao longo de sua vida, assim como fizeram Piazza e Rui (1999).

### **2.7 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO**

#### **2.7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A resistência à compressão tem sido o parâmetro investigado nas pesquisas voltadas à adição de materiais pozolânicos ou cimentantes em matriz contendo aglomerantes hidráulicos ou aéreos, para avaliar o desempenho da adição em estudo, ao mesmo tempo em que se determina a propriedade de resistência mecânica.

##### **2.7.1.1 POZOLANICIDADE**

As normas brasileiras e internacionais que permitem a avaliação do índice de atividade pozolânica usam a propriedade das pastas ou argamassas de resistirem ao esforço de compressão. A NBR 5752 (1992) – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento, define o índice de atividade pozolânica com cimento Portland por:

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100\% \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

$f_{cB}$  = Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B).

$f_{cA}$  = Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A).

Cherief *et al.* (1999) comentam que a avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada e de outras pozolanas se resume em três categorias: química, física e mecânica. A avaliação química feita pela recomendação ISO R 863-1968 mede a redução da concentração de íons de cálcio quando a pozolana é adicionada numa solução saturada de cal. Halse e Pratt (1983) *apud* Cherief *et al.* (1999) citam que tem sido utilizada a técnica de difração de raios X para monitorar o progresso de captação da cal pela pozolana numa pasta de cimento Portland contendo cinza leve e cinza de casca de arroz. Os resultados obtidos por esses métodos indicam boa correlação linear entre a cal combinada na reação e a resistência à compressão de argamassas em seis meses e um ano.

A norma ASTM C 311 também descreve o desenvolvimento de resistência de pozolanas comparando a resistência à compressão entre a mistura de controle (cal ou cimento Portland) e a mistura contendo pozolana.

Assim, verifica-se que, mesmo analisando o índice de pozolanicidade sob qualquer uma das três categorias citadas por Cherief *et al.* (1999), obtém-se uma correlação importante com a resistência à compressão e, na categoria mecânica, a resistência à compressão é o parâmetro que define o índice de pozolanicidade.

Ambroise *et al.* (1985) usaram o ensaio de análise térmica diferencial (ATD) para estudar a atividade pozolânica do metacaulim, em que se moeu a amostra do material em estudo em partículas de dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$  (600 mg) e, comparando-a com material inerte (50% hidróxido de cálcio e 50% sílica moída), foram identificados os picos de hidróxido de cálcio, que pela área resultante do diferencial de temperatura



entre a pozolana e o material inerte obteve-se uma relação de consumo de hidróxido de cálcio consumido pela pozolana.

Cheriaf *et al.* (1999), usando a técnica desenvolvida por Ambroise *et al.* (1985), avaliaram a atividade pozolânica da cinza pesada e compararam com a resistência à compressão das misturas, obtendo os resultados da tabela 2.9 abaixo.

**Tabela 2.9 - Atividade pozolânica da cinza pesada com cal (Cheriaf *et al.*, 1999)**

| Características                    | Idade (dias) |     |     |      |
|------------------------------------|--------------|-----|-----|------|
|                                    | 7            | 14  | 28  | 90   |
| Resistência à compressão (MPa)     | 1,8          | 3,2 | 6,4 | 17,3 |
| Consumo de hidróxido de cálcio (%) | 5            | 15  | 37  | 60   |

Observa-se, no entanto, que apesar da resistência à compressão ser avaliada na maioria dos estudos sobre argamassas, essa propriedade não é tão importante quanto é no estudo do comportamento de concretos.

2.7.1.2 SOLICITAÇÕES DAS ARGAMASSAS

Cincotto *et al.* (1995) citam que entre as solicitações às quais pode estar sujeita a argamassa endurecida, destacam-se as devidas às movimentações higroscópicas e térmicas, tanto no próprio revestimento quanto na base.

Segundo Cincotto *et al.* (1995) pode ocorrer ainda movimentos higroscópicos diferenciados entre as várias camadas do revestimento (reboco, emboço, chapisco e base) gerando tensões de cisalhamento nas interfaces.

**Tabela 2.10 - Resistência média à compressão simples aos 28 dias de idade, de seis cps, tanto das argamassas produzidas na obra, quanto das argamassas teóricas, reproduzidas depois no laboratório. Argamassas identificadas pelo tipo de plastificante (Siqueira e Selmo, 1995)**

| ENSAIO                         | Cps                        | Res. Compressão     | I5   | I15  | V5   | V15  | “Caulim” |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------|------|------|------|------|----------|
| Analogia NBR 7215              | Cilíndricos (5x10 cm)*     | Média (MPa)         | 3,2  | 2,9  | 3,6  | 3,1  | 5,0      |
|                                |                            | Desvio-Padrão (MPa) | 0,1  | 0,15 | 0,25 | 0,36 | 0,40     |
|                                |                            | Coef. Variação (%)  | 3,1  | 5,2  | 7,0  | 12,0 | 8,0      |
| Analogia NBR 7215              | Cilíndricos (5x10 cm)**    | Média (MPa)         | 3,2  | 3,0  | 3,8  | 2,4  | 2,9      |
|                                |                            | Desvio-Padrão (MPa) | 0,36 | 0,27 | 0,40 | 0,20 | 0,19     |
|                                |                            | Coef. Variação (%)  | 11,2 | 9,0  | 10,5 | 8,3  | 6,5      |
| DIN 18550 Part 2 e EN 196-1/90 | ½ de prismas (4x4x16 cm)** | Média (MPa)         | 3,1  | 2,6  | 3,5  | 2,6  | 3,8      |
|                                |                            | Desvio-Padrão (MPa) | 0,43 | 0,24 | 0,43 | 0,24 | 0,43     |
|                                |                            | Coef. Variação (%)  | 13,9 | 9,2  | 12,3 | 9,2  | 11,3     |

**Notas:** (\*) Valores das argamassas produzidas na obra;  
(\*\*) Valores das argamassas reproduzidas em laboratório.

Siqueira e Selmo (1995), em estudo comparativo entre argamassas de revestimentos externos com cimento e cal e com cimento e solo fino beneficiado, concluíram que o decréscimo da resistência à compressão parece não afetar o desempenho das argamassas quando aplicadas como revestimento externo, sendo inclusive os valores de resistência aceitáveis pela norma DIN 18550-Part 2 (tabela 2.10).

### 2.7.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Cincotto *et al.* (1995) citam que a aderência tem papel significativo no desempenho do revestimento. Essa propriedade não diz respeito somente à argamassa, mas ao seu comportamento quanto à absorção de tensões que surgem na interface do revestimento com os componentes da base.

Levy e Helene (1995), avaliando o comportamento de argamassas com incorporação de entulho reciclado, concluíram que o chapisco melhora a resistência de aderência à tração, conforme figura 2.6.

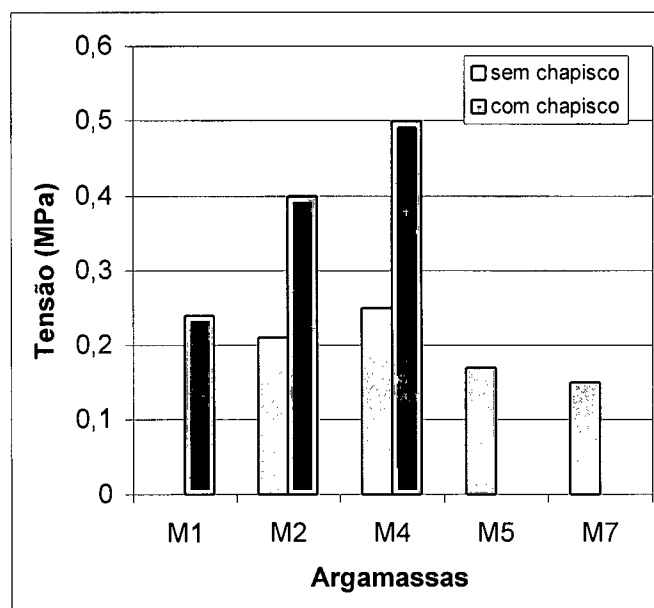


Figura 2.6 - Resistência de aderência à tração sobre bloco cerâmico (Levy e Helene, 1995).

Os aspectos que influenciam a resistência de aderência das argamassas de revestimento são: **(i)** a consistência, **(ii)** a capacidade de retenção de água e **(iii)** o teor de ar incorporado nas argamassas (Cincotto *et al.*, 1995).

Silva *et al.* (1999), após analisarem os resultados entre argamassas convencionais e argamassas com argila calcinada nos traços em volume **1 : 1 : 6** e **1 : 2 : 9**, explicam as boas resistências de aderência das argamassas convencionais devido ao maior índice de consistência dessas argamassas sobre aquelas com argila calcinada: "... a consistência mais fluida destas argamassas propicia uma boa capacidade de aderência."

Pode-se inferir que a resistência de aderência de argamassas de revestimento ao substrato possui uma correlação elevada com a adesão inicial (Cincotto *et al.*, 1995).

Há conclusões diversas sobre as causas da adesão inicial. Rosello (1976) afirma que a adesão inicial está essencialmente ligada às características reológicas da pasta aglomerante, atribuída à baixa tensão superficial da pasta, à responsabilidade pela adesão física ao substrato e aos grãos do agregado. Já na análise de Addleson (1986), a aderência do revestimento ocorre basicamente pela ancoragem mecânica da pasta e da argamassa aos poros e irregularidades da base, sendo atribuída pouca importância à tensão superficial.

Disso ainda se pode concluir que a aderência depende: **(i)** da energia de lançamento da argamassa ao substrato, que é a energia cinética da argamassa que será absorvida pela penetração dessa argamassa nas irregularidades da superfície do substrato, garantindo substancial aumento da área de contato argamassa-substrato, além de possibilitar um aumento da adesividade mecânica; **(ii)** da fluidez da argamassa que reduzirá o teor de ar incorporado, além de possibilitar "molhar", envolvendo toda a superfície do substrato; e **(iii)** da taxa de absorção do substrato, que irá absorver parte da água e parte do gel de hidratação do cimento.

### **2.7.3 MASSA ESPECÍFICA**

A massa específica da argamassa no estado endurecido é uma propriedade importante para se avaliar o índice de vazios, permeabilidade, resistência e fator de empacotamento dos componentes secos.

Para Neville (1997), o requisito de que o agregado ocupe o maior volume relativo possível é, em primeiro lugar, de caráter econômico, pois o agregado tem custo menor que a pasta, mas existem também fortes razões de caráter técnico, pelas quais não é

desejável uma mistura muito rica em cimento. Também se admite que, quanto maior a quantidade de sólidos que pode ser colocada em um dado volume de concreto, maior será a massa específica e, portanto, maior a resistência.

#### 2.7.4 ÍNDICE DE VAZIOS

O índice é a relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total da argamassa.

A NBR 9778 (1987) fixa a seguinte expressão para o cálculo do índice de vazios:

$$I_v = \frac{(M_{sat} - M_s)}{(M_{sat} - M_i)} \times 100 \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Sendo:

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa

$M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água

De acordo com os procedimentos da norma, o índice de vazios foi determinado, no presente estudo, em corpos-de-prova com idade de 31 dias.

#### 2.7.5 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A norma NBR 9779 (1987) define absorção de água por capilaridade de argamassa ou de concreto endurecido pela expressão:

$$C = \frac{A - B}{S} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade

A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado.

$B$  = massa do corpo-de-prova seco em estufa ventilada, à temperatura de  $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

$S$  = área da seção transversal da superfície em contato com a água (área da seção molhada inicial).

No presente estudo, a absorção de água por capilaridade foi determinada a partir de corpos-de-prova com idade de 42 dias, de acordo com os procedimentos da norma.

A norma brasileira NBR 9779 (1987) não fixa idade para o ensaio; no entanto, a evolução das reações de hidratação e a aeração das argamassas mistas fazem com que haja, com o tempo, um gradativo preenchimento dos capilares.

Calmon *et al.* (1997) e Carvalho e Cavalcanti Jr (1997), estudando argamassas com adição de pó de granito e “arenoso”, respectivamente, ensaiaram seus corpos-de-prova na idade de 28 dias, e em ambos os casos houve saturação dos corpos-de-prova muito antes do término do ensaio prescrito pela NBR 9779, inclusive os corpos-de-prova das argamassas de referência. Assim sendo, os resultados foram mostrados de forma particular, isto é, os tempos de leitura foram reduzidos e foi apresentado o tempo de saturação dos corpos-de-prova ao invés da altura capilar.

A norma brasileira que fixa os procedimentos de ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade em argamassa e concreto notifica que “o teste não tem significado se a ascensão capilar máxima atingir a altura do corpo-de-prova”.

Assim, diante dos dois trabalhos científicos citados anteriormente e verificado também neste estudo de argamassas, sugere-se que haja uma revisão na referida norma, visando a padronização dos ensaios.

Carvalho e Cavalcanti Jr.(1997), analisando os resultados das argamassas mistas com substituição da areia por “arenoso” com teor elevado de material pulverulento, concluíram que, em todos os percentuais de substituição, a absorção por capilaridade diminuiu ou manteve-se igual à argamassa de referência, com tempo mínimo de saturação em três horas, conforme mostrado na tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Absorção de água das argamassas com teores de substituições de areia por “arenoso” (Carvalho e Cavalcanti Jr, 1997)

| Traço        | Absorção    |              |
|--------------|-------------|--------------|
|              | Imersão (%) | Capilaridade |
| T-Referência | 16,0        | 3 horas      |
| T-10         | 15,5        | 6 horas      |
| T-20         | 14,3        | 3 horas      |
| T-40         | 13,3        | 3 horas      |
| T-70         | 11,5        | 6 horas      |
| T-100        | 11,5        | 24 horas     |
| Metodologia  | NBR 9778    | NBR 9779     |

Calmon *et al.* (1997) estudaram o comportamento das argamassas mistas (dois traços, 1 : 2 : 8 e 1 : 1 : 6 – cimento : cal : areia) substituindo a cal por pó de granito nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%.

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção por capilaridade pela NBR 9779 mostraram que houve redução da absorção à medida que foi aumentando a substituição da cal pelo pó de granito. Concluíram que o pó de granito poderia estar atuando como *filler*, reduzindo a formação de capilares na argamassa e melhorando seu desempenho. Os resultados foram plotados na tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Absorção de água das argamassas com teores de substituições de cal por pó de granito (Calmon et al., 1997)

| Traço (volume) | Argamassa    | Coeficiente de Absorção | Traço (volume) | Argamassa    | Coeficiente de Absorção |
|----------------|--------------|-------------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| 1:2:8          | T-Referência | 2,1765                  | 1:1:6          | T-Referência | 1,5479                  |
|                | T-25%        | 1,9025                  |                | T-25%        | 1,5073                  |
|                | T-50%        | 1,9346                  |                | T-50%        | 1,3449                  |
|                | T-75%        | 1,8434                  |                | T-75%        | 1,4379                  |
|                | T-100%       | 1,5978                  |                | T-100%       | 1,0364                  |

2.7.6 ABSORÇÃO POR BAIXA PRESSÃO (MÉTODO DO CACHIMBO)

Procedimento criado pelo CSTC (NIT 140/1982) que permite medir a absorção de água de revestimentos verticais com uma pressão inicial de 92 mm de coluna de água, correspondente à pressão estática do vento a 140 km/h.

Propriedade ligada à permeabilidade, caracteriza-se pela passagem da água através da argamassa endurecida por meio de infiltração sob pressão.

Mehta e Monteiro (1994), após compararem o coeficiente de permeabilidade de pasta de cimento, concreto e argamassas de cimento com a relação água/cimento e a dimensão máxima dos agregados, conforme figura 2.7, concluíram que a permeabilidade do

concreto à água depende principalmente da relação água/cimento (que determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares) e da dimensão máxima do agregado (que influencia as microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento).

Cincotto *et al.* (1995) comentam que as argamassas de cimento são menos permeáveis, diminuindo a permeabilidade com o aumento do teor de cimento. A permeabilidade reduz, também, à medida que evolui o endurecimento da argamassa. É diretamente proporcional à relação água/aglomerantes e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante.

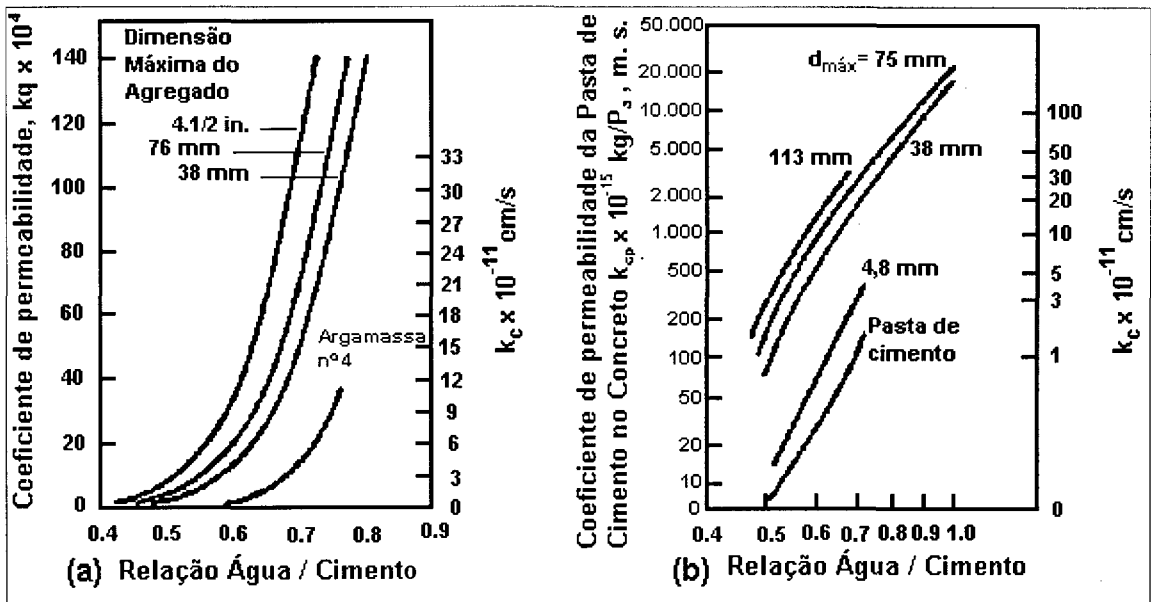


Figura 2.7 - Influência da relação água/cimento e dimensão máxima do agregado na permeabilidade do concreto: (a)  $K_q$  é uma medida relativa do fluxo de água através do concreto em metros cúbicos por ano por metro quadrado de área para um gradiente hidráulico unitário. [(a) De *Concrete Manual*, 8<sup>th</sup> Edition, U. S. Bureau of Reclamation, 1975, p.37, (b) adaptado de *Beton-Bogen*, Aalborg Cement Co., Aalborg, Denmark, 1979]. (Mehta e Monteiro, 1994).

## 2.8 REAÇÕES DE ENDURECIMENTO DAS ARGAMASSAS

A incorporação das cinzas nas argamassas ocasiona diversos efeitos nas suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O emprego das cinzas da combustão do carvão mineral na produção de argamassas, concretos ou em adições ao cimento Portland deve-se principalmente aos teores de  $\text{SiO}_2$ . Todavia, ocorrem diferenças entre as cinzas, principalmente ao serem analisadas

as características mineralógicas, mais precisamente a forma em que a sílica se encontra, se cristalina ou amorfa.

Segundo Cheriaf *et al.* (1999), a reatividade das cinzas não está ligada somente à presença das formas amorfas, mas também à quantidade de cinza e ao teor de partículas finas que podem promover efeitos físicos, além da reatividade pozolânica.

As reações pozolânicas entre as cinzas e a pasta de cimento são descritas por Mehta (1987) da seguinte forma:

- i) após a adição de água, forma-se uma película impermeável ao redor das partículas, ocorrendo reação somente após disponibilidade de hidróxidos alcalinos ou de cálcio e íons sulfatados em concentração suficiente na fase de contato;
- ii) ocorrida a reação, os íons hidróxidos ativam a hidratação dos aluminossilicatos vítreos;
- iii) prosseguem as reações pozolânicas, consumindo hidróxido de cálcio e formando silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, enquanto houver disponibilidade de hidróxido de cálcio.

### **2.8.1 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL**

Esta técnica tem demonstrado bons resultados na medida da evolução do consumo de hidróxido de cálcio pelo material pozolânico, permitindo qualificar materiais com características pozolânicas.

Em estudo das propriedades da cinza pesada, Cheriaf *et al.* (1999) utilizaram a análise térmica diferencial para medir o consumo de hidróxido de cálcio da argamassa cal e cinza pesada, nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias. Tal estudo obteve correlação linear significativa, quando comparado à resistência à compressão, conforme figura 2.8.



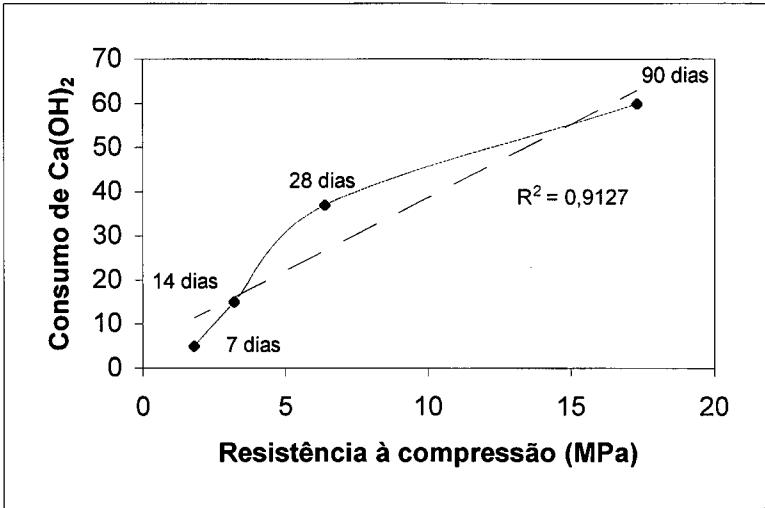


Figura 2.8 - Comparação entre a relação de consumo de hidróxido de cálcio pela cinza pesada e *filler* inerte, obtido por meio de análise térmica diferencial (ATD), e a resistência à compressão da argamassa de cinza pesada e cal, aos 7, 14, 28 e 90 dias de hidratação (dados plotados de Cheriaf *et al.*, 1999).

### 2.8.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Essa técnica tem sido utilizada para identificar e quantificar fases de compósitos.

Consiste na emissão de raios X de comprimento de onda ( $\lambda$ ) conhecido, que incide sobre a amostra do material a ser estudado. Varia-se o ângulo de incidência do feixe de raios X sobre a superfície da amostra, que se difratam em diferentes direções. Há um detetor de raios X que gira junto com a amostra para captar os raios que difratam num ângulo igual ao ângulo de incidência.

À medida que a amostra gira  $x^\circ$ , o detetor gira  $2x^\circ$ , isto é, para um ângulo de incidência  $\theta$ , o detetor posiciona-se em um ângulo  $2\theta$  em relação ao feixe de raios X emitidos, conforme figura 2.9.

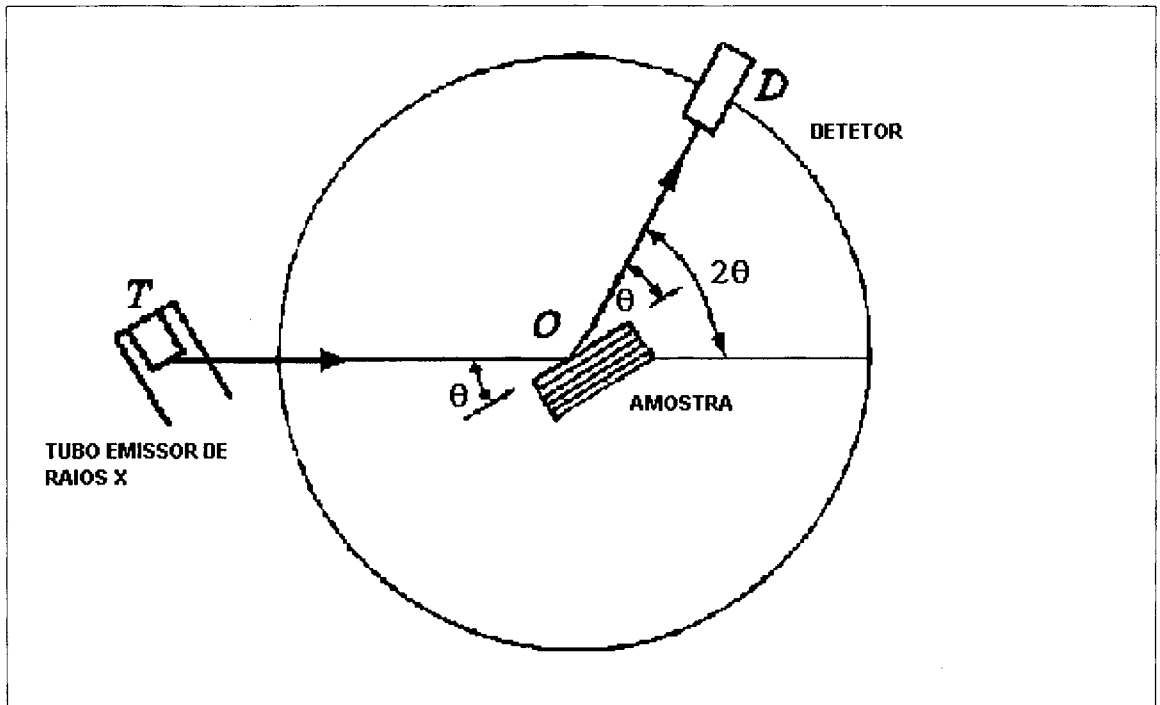


Figura 2.9 - Representação da Geometria  $\theta - 2\theta$ .

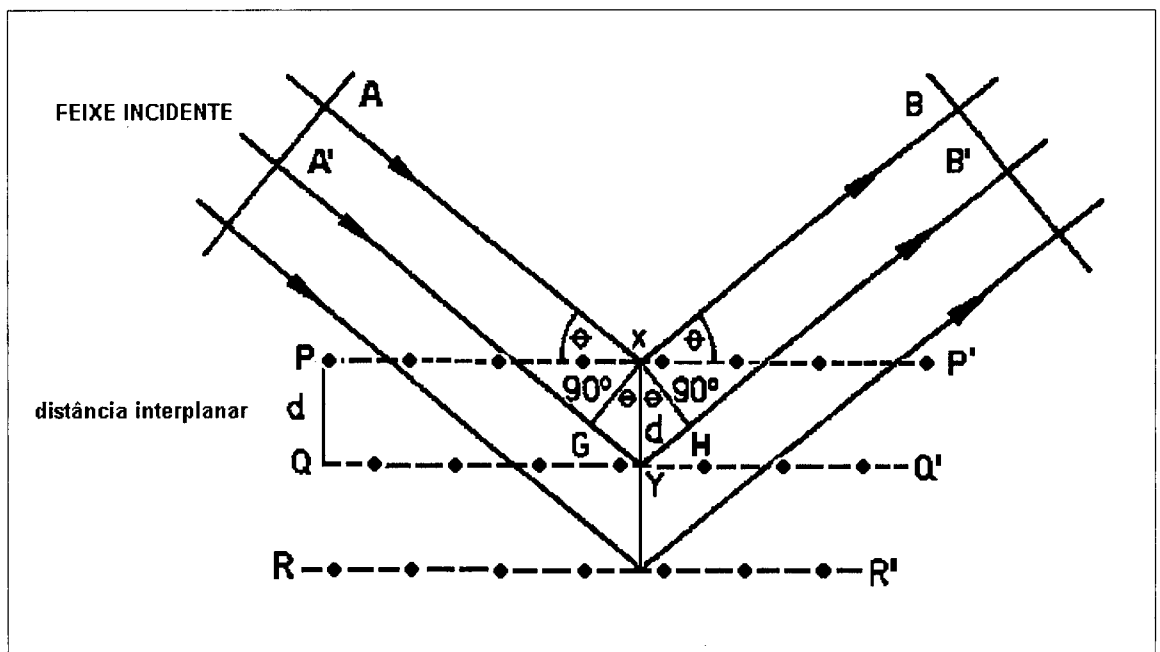


Figura 2.10 - Representação geométrica da lei de Bragg .

Um feixe de raios X, com uma determinada frequência, incide sobre um átomo. Este se comporta como um centro de espalhamento e vibra na mesma frequência do feixe incidente, espalhando-o para todas as direções. Quando os átomos estão organizados num reticulado, esse feixe incidente sofrerá interferência construtiva em certas direções,

e destrutiva em outras. A interferência construtiva da radiação espalhada ocorre quando a diferença de percurso do feixe espalhado por planos sucessivos for igual a um número inteiro de  $\lambda$ . A lei de Bragg é uma interpretação geométrica do fenômeno de difração num reticulado organizado de átomos, conforme está representado na figura 2.10. Essa lei é uma consequência da periodicidade da rede e não está associada a cada átomo em particular, ou a diferentes números atômicos. A condição para haver difração, segundo Bragg, é:

$$n\lambda = 2d.\text{sen}\theta \quad \text{(Equação 2.4)}$$

Onde:

$n$  = número inteiro de comprimento de onda;

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação incidente;

$d$  = distância interplanar dos sucessivos planos do cristal e

$\theta$  = ângulo entre o plano atômico e os feixes incidente e refletido.

Para fazer a análise mineralógica de cinza leve, Malhotra e Mehta (1996) utilizaram a difração de raios X, demonstrando que 50-90% é composta de material vítreo. A composição química e a reatividade da fase vítrea na cinza leve dependem do teor de cálcio. A cinza leve com baixos teores de cálcio (carvões betuminosos) contém vidros de aluminossilicatos, que parecem ser menos reativos do que o vidro de aluminossilicato cálcico presente em cinza leve com alto teor de cálcio, conforme figura 2.11.

Os minerais cristalinos tipicamente encontrados em cinza leve com baixo teor de cálcio são: mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ), silimanita ( $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ ), hematita e magnetita. Esses minerais não possuem qualquer atividade pozolânica.

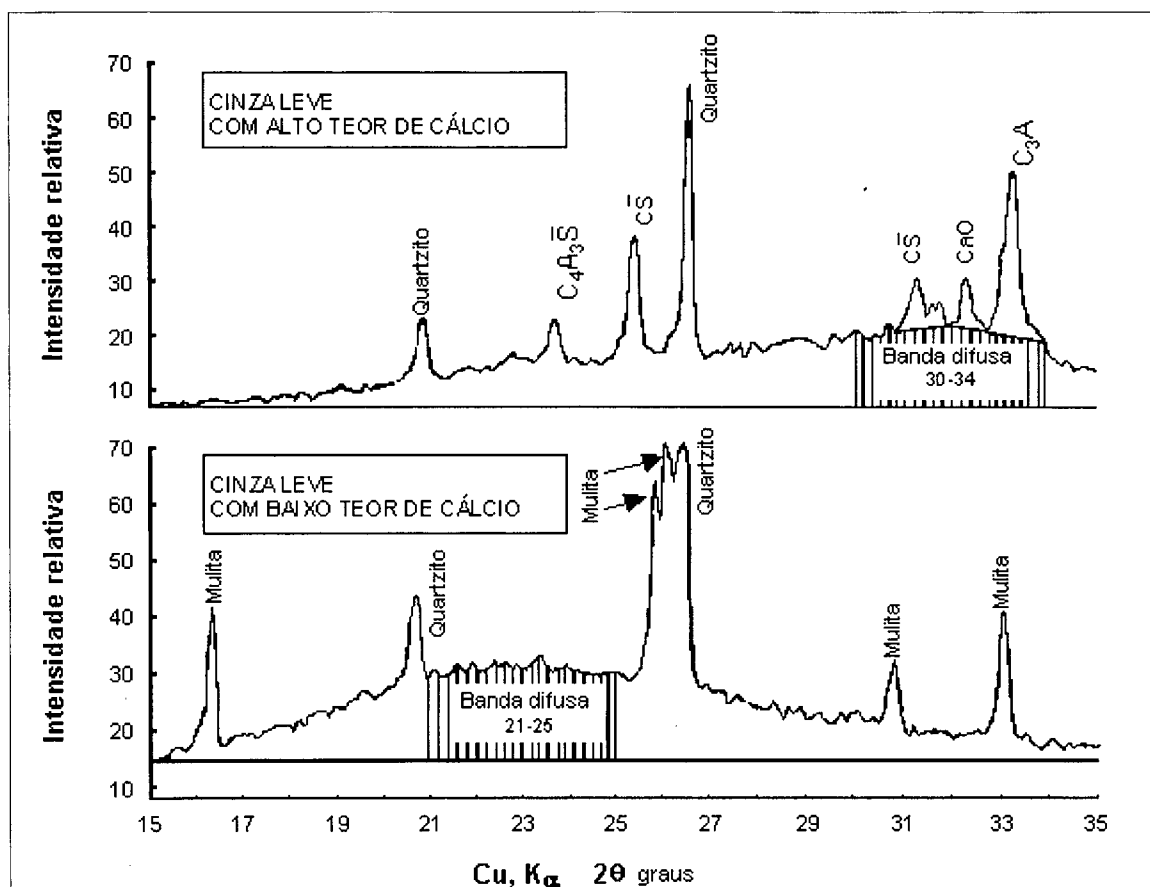


Figura 2.11 - Difratogramas de raios X das cinzas leves classes F e C ASTM (Malhotra e Mehta, 1996).

Os minerais cristalinos tipicamente encontrados em cinza leve com alto teor de cálcio são: quartzo, aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), aluminossulfato de cálcio ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ ), anidrito ( $\text{CaSO}_4$ ),  $\text{CaO}$  livre, periclácio ( $\text{MgO}$  livre) e sulfatos de álcalis. Exceto o quartzo e o periclácio, todos os demais minerais cristalinos presentes na cinza leve com alto teor de cálcio reagem com água em temperatura ambiente.

Neville (1997), discorrendo sobre a hidratação do cimento, que pode ser determinada de vários modos, citou entre eles a medição da quantidade de cimento não hidratado presente, usando análise quantitativa com raios X.

Seligmann e Greening (1964) *apud* Neville (1997) comentam que para estudar as reações nas primeiras idades podem ser usadas técnicas termogravimétricas e difração por varredura contínua de raios X de pastas frescas em processo de hidratação.

### 3 METODOLOGIA E MATERIAIS

Com base na revisão bibliográfica sobre características e propriedades das argamassas e considerando-se o potencial de pozolanicidade das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, estabeleceu-se o programa experimental desta pesquisa, que se constitui das seguintes etapas:

- 1<sup>ª</sup>) definição da areia;
- 2<sup>ª</sup>) escolha da melhor composição areia–cinza pesada;
- 3<sup>ª</sup>) caracterização dos materiais empregados na pesquisa;
- 4<sup>ª</sup>) confecção das argamassas e realização dos ensaios no estado fresco;
- 5<sup>ª</sup>) realização dos ensaios no estado endurecido das argamassas confeccionadas com cinzas volantes (CZL), em substituição ao cimento Portland CP I-32, e diferentes teores de cinza pesada (CZP), em substituição à areia;
- 6<sup>ª</sup>) realização dos ensaios de análise térmica e difração para identificar os compostos formados.

Para o desenvolvimento do programa experimental, as atividades foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção e no Grupo ValoRes (Valorização de Resíduos) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Os ensaios de caracterização e identificação dos compostos foram realizados em laboratórios especificados ao longo do texto.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

3.1.1 CIMENTO

Utilizou-se cimento Portland comum com adição de *filler* calcário, CP I S, classe 32, marca Votoran. A caracterização foi fornecida pelo fabricante, conforme apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Laudo técnico – Cimento Portland CP I S - 32 (Cimento Rio Branco S.A., março/2000)

| ENSAIOS FÍSICOS                    | Unidade  | MÉDIA  | DESVIO | MÍNIMO | MÁXIMO |
|------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| Peneira 200                        | %        | 1,12   | 0,14   | 0,80   | 1,50   |
| Peneira 325                        | %        | 7,69   | 1,01   | 5,90   | 10,50  |
| Blaine                             | m2/kg    | 376,46 | 26,30  | 341,00 | 436,00 |
| Água de consistência normal        | %        | 27,78  | 0,29   | 27,20  | 28,40  |
| Início de pega                     | hs : min | 3:34   | 0:20   | 3:10   | 4:45   |
| Fim de pega                        | hs : min | 4:46   | 0:20   | 4:19   | 5:55   |
| Expansão à quente                  | mm       | 0,71   | 0,32   | 0,00   | 1,50   |
| Resistência 1 dia                  | MPa      | 17,97  | 1,27   | 15,10  | 20,00  |
| Resistência 3 dias                 | MPa      | 27,17  | 1,13   | 25,30  | 29,50  |
| Resistência 7 dias                 | MPa      | 31,56  | 1,31   | 29,10  | 34,40  |
| Resistência 28 dias (mês anterior) | MPa      | 36,23  | 1,53   | 34,50  | 39,10  |
| Massa específica                   | kg/dm3   | 3,14   |        |        |        |
| ENSAIOS QUÍMICOS                   | Unidade  | MÉDIA  | DESVIO | MÍNIMO | MÁXIMO |
| Perda ao Fogo                      | %        | 3,25   | 0,25   | 2,72   | 3,85   |
| SiO2                               | %        | 18,22  | 0,19   | 17,85  | 18,62  |
| Al2O3                              | %        | 4,64   | 0,14   | 4,45   | 5,08   |
| Fe2O3                              | %        | 2,77   | 0,03   | 2,72   | 2,82   |
| CaO                                | %        | 60,12  | 0,42   | 59,27  | 60,86  |
| MgO                                | %        | 6,10   | 0,09   | 5,85   | 6,21   |
| K2O                                | %        | 1,28   | 0,03   | 1,22   | 1,33   |
| Na2O                               | %        | 0,09   | 0,05   | 0,03   | 0,25   |
| SO3                                | %        | 3,04   | 0,15   | 2,67   | 3,27   |
| Resíduo insolúvel                  | %        | 0,87   | 0,14   | 0,62   | 1,09   |

Para determinação da massa unitária do cimento, foram seguidos os procedimentos da NBR 7251 (1982) - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Os resultados encontram-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Massa unitária do cimento CP I – S

| Material | Amostra (kg) |       |       | Média (kg) | Massa Unitária (Kg/dm³) |
|----------|--------------|-------|-------|------------|-------------------------|
|          | 1            | 2     | 3     |            |                         |
| Cimento  | 16,68        | 16,67 | 16,46 | 16,60      | 1,11                    |

3.1.2 CAL

Utilizou-se cal hidratada, classificada pela NBR 7175 (1992) como tipo CH-III, adquirida no mercado de consumo.

A amostra usada nesta pesquisa foi caracterizada quanto ao teor de óxidos totais, conforme tabela 3.3, em ensaio químico realizado no Laboratório URGC - *Matériaux*, do INSA-Lyon, França.

Tabela 3.3 - Análise química da cal hidratada

| SiO <sub>2</sub><br>% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | MnO<br>% | MgO<br>% | CaO<br>% | Na <sub>2</sub> O<br>% | K <sub>2</sub> O<br>% | TiO <sub>2</sub><br>% | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>% | P.F.<br>% | C org<br>% | CO <sub>2</sub> t<br>% | S<br>% | Cl<br>(ppm) |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------|------------|------------------------|--------|-------------|
| 1.46                  | nd                                  | 0.15                                | nd       | 31.10    | 41.07    | nd                     | nd                    | nd                    | nd                                 | 24.29     | 0.01       | 5.99                   | <0.01  | 31          |

nd – não detectado.

A cal utilizada neste estudo é a do tipo CH-III, possuindo um percentual significativo de óxido de magnésio (31,10%) em relação ao percentual de óxido de cálcio (41,07%) da cal.

Considerando-se a classificação da cal hidratada citada por Guimarães (1998), em que a cal calcítica possui teor de CaO entre 90 e 100%, a dolomítica com teor de CaO entre 58 e 64% e o teor de MgO entre 40 e 34% e a cal hidratada magnesiana com teor de CaO entre 65 e 89%, a cal utilizada neste estudo possui teores de CaO e MgO abaixo desses limites, não se enquadrando em nenhuma dessas classificações.

A caracterização executada pelo fabricante da cal, pode ser observada na tabela A-1 dos anexos.

Para determinação da massa unitária da cal, foram seguidos os procedimentos da NBR 7251 (1982), Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Os resultados encontram-se na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Massa unitária da cal hidratada

| Material      | Amostra (kg) |       |      | Média<br>(kg) | Massa Unitária<br>(Kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------------|--------------|-------|------|---------------|---|
|               | 1            | 2     | 3    |               |   |
| Cal Hidratada | 10,78        | 10,68 | 10,8 | 10,75         | 0,72                                    |

3.1.3 AREIA

Inicialmente caracterizou-se a areia proveniente do município de Palhoça, localidade de Sertão do Campo (SC), mediante secagem em estufa por 24 horas no mínimo, à temperatura de 105±5°C, resfriamento à temperatura ambiente, quando então executou-se o ensaio de granulometria, obedecendo aos procedimentos da NBR 7211 (1983) e de

material pulverulento NBR 7216 (1983), cujos resultados são apresentados na tabela 3.5 e figura 3.1.

Tabela 3.5 - Análise granulométrica da areia de Sertão do Campo

| #<br>Peneiras<br>(mm)          | Amostra 1              |             |                       | Amostra 2              |             |                       | Média da<br>% retida<br>acumulada | %<br>passante<br>acumulada |
|--------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|                                | Massa<br>retida<br>(g) | %<br>retida | % retida<br>acumulada | Massa<br>retida<br>(g) | %<br>retida | % retida<br>acumulada |                                   |                            |
| 4,80                           | 4,4                    | 0,5         | 0,5                   | 5                      | 0,5         | 0,5                   | 0,5                               | 99,5                       |
| 2,40                           | 33,4                   | 3,5         | 4,0                   | 38                     | 4,0         | 4,5                   | 4,2                               | 95,8                       |
| 1,20                           | 230,2                  | 24,1        | 28,1                  | 232                    | 24,4        | 28,9                  | 28,5                              | 71,5                       |
| 0,60                           | 238,9                  | 25,1        | 53,2                  | 243                    | 25,6        | 54,5                  | 53,8                              | 46,2                       |
| 0,30                           | 310,8                  | 32,6        | 85,7                  | 305                    | 32,1        | 86,6                  | 86,2                              | 13,8                       |
| 0,15                           | 119,5                  | 12,5        | 98,3                  | 115                    | 12,1        | 98,7                  | 98,5                              | 1,5                        |
| 0,00                           | 16,4                   | 1,7         | 100,0                 | 12                     | 1,3         | 100,0                 | 100,0                             | 0,0                        |
| Soma                           | 953,6                  | 100,0       |                       | 950                    | 100,0       |                       |                                   |                            |
| Diâmetro Máximo Característico |                        |             |                       |                        |             |                       |                                   | 2,40                       |
| Diâmetro Mínimo Característico |                        |             |                       |                        |             |                       |                                   | 0,15                       |
| Módulo de finura               |                        |             |                       |                        |             |                       |                                   | 2,72                       |
| Material Pulverulento          |                        |             |                       |                        |             |                       |                                   | 0,43%                      |

O gráfico da figura 3.1 representa a curva da análise granulométrica, em que a areia enquadra-se na Zona 3, ou seja areia média, definida pela NBR 7211 (1983).

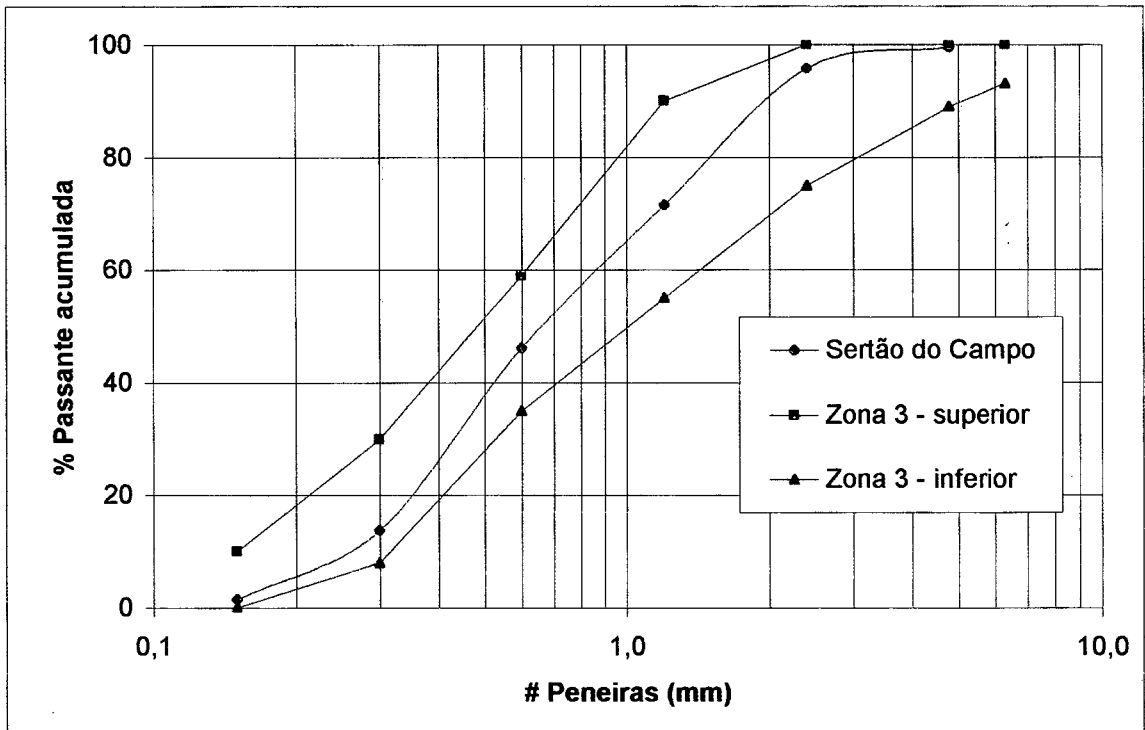


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia de Sertão do Campo em comparação com os limites da areia média, zona 3, da NBR 7211, 1983.



Após a caracterização inicial da areia, principiou-se a separação da granulometria por meio de peneiramento da areia seca em estufa ( $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) durante período superior a 24 horas.

Iniciou-se um trabalho de composição das frações granulométricas (retidas nas peneiras com abertura de malha # **0,15; 0,30; 0,60 e 1,20 mm**) visando alcançar composição com a maior massa unitária.

Foram ensaiadas 17 composições entre as quatro granulometrias selecionadas, avaliando-se a massa unitária segundo um procedimento adaptado da NBR 7810 (1983), Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária, conforme descrito abaixo.

- i) após a homogeneização das frações de areia de cada uma das 17 composições, lançava-se a areia de uma altura de 10 cm, dentro de um recipiente cúbico de aço (5 mm de espessura), medindo 15 cm de aresta, com capacidade volumétrica de  $3,375\text{ dm}^3$ ;
- ii) completava-se o volume sem rasar e adensava-se a areia, colocando-se o recipiente cúbico sobre a mesa de queda livre descrita na NBR 7215, mediante dez golpes em 10 segundos;
- iii) completava-se o volume sem rasar, submetendo o recipiente a mais cinco golpes na mesa de queda livre, em 5 segundos;
- iv) completava-se o volume e rasava-se o topo do recipiente com uma régua metálica, formando  $90^{\circ}$  com a superfície da areia em movimentos de vai e vem;
- v) media-se a massa da areia contida no recipiente em balança com precisão de 0,1 grama;
- vi) dividindo a massa da areia pela capacidade volumétrica do recipiente, encontrava-se a massa unitária.

Para cada uma das frações retidas nas peneiras de abertura de malha # **1,20; 0,60; 0,30 e 0,15 mm**, foi determinada a massa específica aparente da areia, utilizando-se um picnômetro com volume de 250 ml.

Os valores de massa específica aparente de cada composição da areia foram obtidos pela média ponderada da composição, multiplicando-se o traço em massa pela massa específica aparente da respectiva fração. Os resultados encontram-se na tabela 3.6, onde estão apresentados ainda os resultados do módulo de finura, da determinação da massa

unitária e do fator de empacotamento dado pela relação entre a massa unitária e a massa específica.

Para a determinação da areia a ser utilizada na pesquisa, foram escolhidas seis das 17 composições de areia (denominadas: **1, 4, 7, 8, 11 e 14**), sendo quatro com maior massa unitária (**4, 8, 11 e 14**), uma com massa unitária média (**7**) e uma com menor massa unitária (**1**).

**Tabela 3.6 - Resultados das composições das areias**

|   | Faixa granulométrica da areia (mm) |             |             |             | Módulo de Finura | Massa Específica (kg/dm3) | Massa Unitária (kg/dm3) | Fator de Empacotamento (MU/ME) |
|---|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|   | 0,15 à 0,29                        | 0,30 à 0,59 | 0,60 à 1,19 | 1,20 à 2,39 |                  |                           |                         |                                |
| Massa Específica da Faixa Granulométrica (kg/dm3) | 2,6285                             | 2,6116      | 2,6173      | 2,6150      |                  |                           |                         |                                |
| Composições                                       | Frações em massa                   |             |             |             |                  |                           |                         |                                |
| 1   | 1                                  | 1           | 1           | 1           | 2,50             | 2,62                      | 1,45                    | 0,55                           |
| 2   | 2                                  | 1           | 1           | 1           | 2,20             | 2,62                      | 1,54                    | 0,59                           |
| 3   | 1                                  | 2           | 1           | 1           | 2,40             | 2,62                      | 1,49                    | 0,57                           |
| 4   | 1                                  | 1           | 2           | 1           | 2,60             | 2,62                      | 1,57                    | 0,60                           |
| 5   | 1                                  | 1           | 1           | 2           | 2,80             | 2,62                      | 1,56                    | 0,59                           |
| 6   | 2                                  | 1           | 3           | 2           | 2,63             | 2,62                      | 1,54                    | 0,59                           |
| 7   | 2                                  | 1           | 4           | 1           | 2,50             | 2,62                      | 1,51                    | 0,58                           |
| 8   | 3                                  | 2           | 2           | 1           | 2,03             | 2,62                      | 1,56                    | 0,60                           |
| 9   | 2                                  | 2           | 3           | 1           | 2,38             | 2,62                      | 1,56                    | 0,59                           |
| 10  | 2                                  | 3           | 3           | 1           | 2,33             | 2,62                      | 1,53                    | 0,59                           |
| 11  | 2                                  | 3           | 3           | 2           | 2,50             | 2,62                      | 1,56                    | 0,60                           |
| 12  | 2                                  | 4           | 3           | 2           | 2,45             | 2,62                      | 1,55                    | 0,59                           |
| 13  | 2                                  | 3           | 4           | 2           | 2,54             | 2,62                      | 1,53                    | 0,59                           |
| 14  | 2                                  | 1           | 4           | 2           | 2,67             | 2,62                      | 1,57                    | 0,60                           |
| 15  | 4                                  | 3           | 8           | 4           | 2,63             | 2,62                      | 1,55                    | 0,59                           |
| 16  | 4                                  | 3           | 8           | 3           | 2,56             | 2,62                      | 1,56                    | 0,59                           |
| 17  | 1                                  | 1           | 3           | 2           | 2,86             | 2,62                      | 1,51                    | 0,58                           |

Misturou-se cada uma dessas seis composições com cinza pesada seca em estufa, passante na peneira # 2 mm, em proporções iguais em volume (a partir da massa unitária previamente definida), utilizando-se o misturador mecânico para homogeneização desses materiais, conforme resultados mostrados na tabela 3.7.

De acordo com o procedimento NBR 7810 (1983) adaptado, descrito acima, para determinar a massa unitária escolheu-se a areia, que, com 50% de cinza pesada em volume, obteve a maior massa unitária.

Tabela 3.7 - Composições de areia e cinza pesada - Massa unitária

| Composição | Massa unitária MU (Kg/dm <sup>3</sup> ) |                 |       |              | Fator de empacotamento (MU/ME) |
|------------|---|-----------------|-------|--------------|--------------------------------|
|            | Primeira amostra                        | Segunda amostra | Média | Relativa (%) |                                |
| A          | 1,120                                   | 1,153           | 1,137 | 100,0        | 0,479                          |
| B          | 1,116                                   | 1,149           | 1,133 | 99,6         | 0,475                          |
| C          | 1,108                                   | 1,137           | 1,123 | 98,8         | 0,471                          |
| D          | 1,095                                   | 1,136           | 1,116 | 98,2         | 0,467                          |
| E          | 1,110                                   | 1,124           | 1,117 | 98,3         | 0,468                          |
| F          | 1,116                                   | 1,153           | 1,135 | 99,8         | 0,475                          |

A coluna Relativa (%) da tabela 3.7 corresponde ao percentual da massa unitária relativa à MU da composição A (maior).

Analisando-se os resultados na tabela 3.7, escolheu-se a areia com traço 1 : 1 : 1 : 1 em massa, de cada uma das frações retidas nas peneiras de malha # 0,15; 0,30; 0,60 e 1,20 mm, para compor a argamassa em estudo que corresponde à composição A, com maior massa unitária. A curva granulométrica do composto binário (CZP+AREIA) é mostrada no gráfico da figura 3.2.

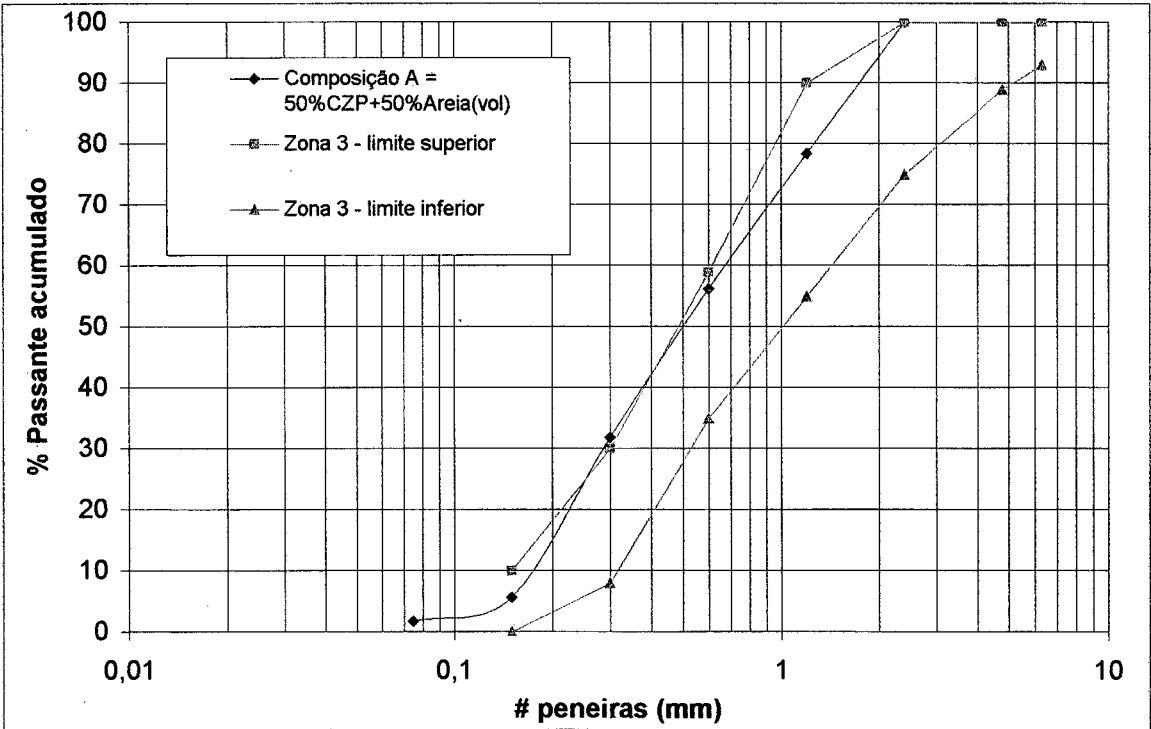


Figura 3.2 - Composição A (CZP+AREIA) em comparação com os limites da areia média, zona 3.

3.1.4 CINZA LEVE (CZL)

A cinza leve empregada nesta pesquisa é originária da queima de carvão pulverizado do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, município de Capivari de Baixo, Estado de Santa Catarina.

Foi coletada no silo da unidade B, e utilizada sem qualquer tratamento ou beneficiamento adicional.

A caracterização da CZL apresenta-se na tabela 3.8, onde são mostrados os resultados dos ensaios químicos realizados no Laboratório URGC - *Matériaux*, do INSA-Lyon, França.

Tabela 3.8 - Análise química da cinza leve

| SiO <sub>2</sub><br>% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | MnO<br>% | MgO<br>% | CaO<br>% | Na <sub>2</sub> O<br>% | K <sub>2</sub> O<br>% | TiO <sub>2</sub><br>% | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>% | P.F.<br>% | C org<br>% | CO <sub>2</sub> t<br>% | S<br>% | Cl<br>(ppm) |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------|------------|------------------------|--------|-------------|
| 57.32                 | 28.96                               | 4.52                                | nd       | 0.69     | 1.30     | 0.22                   | 2.82                  | 1.39                  | 0.10                               | 2.41      | 2.08       | 7.66                   | 0.10   | 20          |

nd – não detectado

Para determinação da massa unitária da cinza leve, foram seguidos os procedimentos da NBR 7251 (1982), Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Os resultados são mostrados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Massa unitária da cinza leve

| Material   | Amostra (kg) |       |       | Média<br>(kg) | Massa Unitária<br>(Kg/dm <sup>3</sup> ) |
|------------|--------------|-------|-------|---------------|---|
|            | 1            | 2     | 3     |               |   |
| Cinza Leve | 13,4         | 13,33 | 13,38 | 13,37         | 0,90                                    |

No ensaio para determinar a massa específica aparente da cinza leve foi utilizado o método do picnômetro, sendo que a massa específica aparente foi obtida pela média de seis amostras ensaiadas em picnômetro de 500 ml. O resultado encontra-se na tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Massa específica aparente da cinza leve utilizada nas argamassas

| Massa específica aparente (kg/dm³) |          |       |       |       |       |       | Desvio<br>padrão | Coefic.<br>de<br>variação<br>(%) |                |
|------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|----------------------------------|----------------|
| Cinza leve                         | Amostras |       |       |       |       |       |                  |                                  | Média<br>(cm³) |
|                                    | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |                  |                                  |                |
| Volume (cm³)                       | 25,117   | 25,82 | 25,39 | 25,86 | 25,02 | 25,61 | 25,47            |                                  |                |
| ME (kg/dm³)                        | 1,999    | 1,945 | 1,973 | 1,951 | 1,999 | 1,969 | 1,973            | 0,023                            |                |
|                                    |          |       |       |       |       |       |                  | 1,169                            |                |

3.1.5 CİNZA PESADA (CZP)

A cinza pesada utilizada nesta pesquisa também é originária do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda e foi coletada na esteira, junto à saída do fecho hídrico da caldeira, antes do equipamento de trituração, na unidade C.

Antes da caracterização, a CZP foi submetida a um processo de secagem em estufa por 72 horas, no mínimo, à temperatura de 105±5°C, quando se resfriava naturalmente à temperatura ambiente. Sem qualquer forma de trituração, foram coletadas amostras e procedeu-se ao ensaio de granulometria, obedecendo aos procedimentos da NBR 7211 (1983). Os resultados são apresentados na tabela 3.11 e na figura 3.3.

O peneiramento mecânico era paralisado após 5 minutos do início, devido ao desgaste dos torrões friáveis de CZP nas malhas das peneiras, caracterizando-se uma forma de cominuição.

Tabela 3.11 - Análise granulométrica da Cinza Pesada Bruta

| #<br>Peneiras<br>(mm)          | Massa<br>retida (g) | % retida | % retida<br>acumulada | % passante<br>acumulada |
|--------------------------------|---------------------|----------|-----------------------|-------------------------|
| 9,50                           | 101,4               | 7,4      | 7,4                   | 92,62                   |
| 6,30                           | 37,2                | 2,7      | 10,1                  | 89,91                   |
| 4,80                           | 51,3                | 3,7      | 13,8                  | 86,18                   |
| 2,40                           | 126,6               | 9,2      | 23,0                  | 76,97                   |
| 1,20                           | 205,2               | 14,9     | 38,0                  | 62,03                   |
| 0,60                           | 160,6               | 11,7     | 49,7                  | 50,34                   |
| 0,30                           | 224,5               | 16,3     | 66,0                  | 34,00                   |
| 0,15                           | 260,3               | 18,9     | 84,9                  | 15,06                   |
| 0,075                          | 140,1               | 10,2     | 95,1                  | 4,86                    |
| 0,00                           | 66,8                | 4,9      | 100,0                 | 0,00                    |
| Soma                           | 1374,0              | 100,0    |                       |                         |
| Diâmetro Máximo Característico |                     |          |                       | >9,50 mm                |
| Diâmetro Mínimo Característico |                     |          |                       | 0,075 mm                |

Tendo em vista a presença de torrões friáveis, a cinza pesada foi desagregada em misturador mecânico durante 4 minutos e então peneirada em peneirador manual, sendo selecionada a CZP passante na peneira de abertura de malha # 2 mm, para compor as argamassas deste estudo.

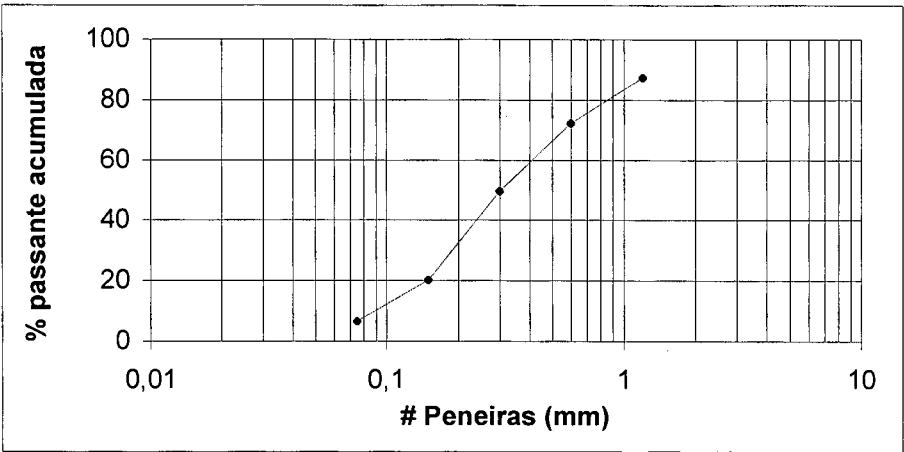


Figura 3.3 - Curva granulométrica da cinza pesada após desagregação.

Executou-se o ensaio de análise granulométrica conforme NBR 7211 (1983) e os resultados constam na tabela 3.12 e na figura 3.3.

Tabela 3.12 - Análise granulométrica da Cinza Pesada sem torrões

| # Peneiras (mm)                | Massa retida (g) | % retida | % retida acumulada | % passante acumulada |
|--------------------------------|------------------|----------|--------------------|----------------------|
| 1,20                           | 151,4            | 12,54    | 12,5               | 87,46                |
| 0,60                           | 182,3            | 15,10    | 27,6               | 72,35                |
| 0,30                           | 274              | 22,70    | 50,4               | 49,65                |
| 0,15                           | 354,5            | 29,37    | 79,7               | 20,28                |
| 0,075                          | 165              | 13,67    | 93,4               | 6,60                 |
| 0,00                           | 79,7             | 6,60     | 100,0              | 0,00                 |
| Soma                           | 1206,9           | 100,0    |                    |                      |
| Diâmetro Máximo Característico |                  |          |                    | >1,20 mm             |
| Diâmetro Mínimo Característico |                  |          |                    | <0,075 mm            |

A caracterização da cinza pesada desagregada passante na peneira # **2,0 mm** apresenta-se na tabela 3.13, onde são mostrados os resultados dos ensaios químicos realizados no Laboratório URGC - *Matériaux*, do INSA-Lyon, França.

Tabela 3.13 - Análise química da cinza pesada

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | P.F. | C org | CO <sub>2</sub> t | S     | Cl    |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|
| %                | %                              | %                              | %   | %    | %    | %                 | %                | %                | %                             | %    | %     | %                 | %     | (ppm) |
| 56.66            | 27.76                          | 5.32                           | nd  | 0.62 | 0.87 | 0.23              | 2.56             | 1.31             | 0.10                          | 4.49 | 3.53  | 13.52             | 0.052 | 83    |

nd – não detectado

Para determinação da massa unitária da cinza pesada, foram seguidos os procedimentos da NBR 7251 (1982) Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Os resultados encontram-se na tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Massa unitária da cinza pesada

| Material     | Amostra (kg) |      |      | Média (kg) | Massa Unitária (Kg/dm³) |
|--------------|--------------|------|------|------------|-------------------------|
|              | 1            | 2    | 3    |            |                         |
| Cinza Pesada | 8,42         | 8,36 | 8,46 | 8,41       | 0,56                    |

No ensaio para se determinar a massa específica aparente da cinza pesada foi utilizado o método do picnômetro, sendo que a massa específica aparente foi obtida pela média de seis amostras ensaiadas em picnômetro de 500 ml. O resultado encontra-se na tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Massa específica aparente da cinza pesada utilizada nas argamassas

| Massa específica aparente (kg/dm³) |          |       |       |       |       |       | Desvio<br>padrão | Coefic.<br>de<br>variação<br>(%) |                |
|------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|----------------------------------|----------------|
| Cinza pesada                       | Amostras |       |       |       |       |       |                  |                                  | Média<br>(cm³) |
|                                    | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |                  |                                  |                |
| Volume (cm³)                       | 25,83    | 26,58 | 26,03 | 26,59 | 26,21 | 25,98 | 26,20            |                                  |                |
| ME (kg/dm³)                        | 1,937    | 1,884 | 1,922 | 1,884 | 1,908 | 1,928 | 1,911            | 0,022                            |                |
|                                    |          |       |       |       |       |       |                  | 1,177                            |                |

3.1.6 ÁGUA

Utilizou-se água da rede pública local, fornecida pela CASAN (SC).

3.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Os ensaios realizados nas argamassas tiveram por finalidade verificar os fatores que influenciam o seu desempenho quando confeccionadas com cinzas leve e pesada. O desempenho foi avaliado nas argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido. Dessa maneira, foram confeccionados corpos-de-prova dessas argamassas, com diferentes teores de cinza leve e cinza pesada, conforme tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Esquema da identificação das argamassas em função das substituições

| Teores de substituição do cimento por CZL | Teores de substituição da areia por CZP |     |      |
|---|---|-----|------|
|   | 0%                                      | 50% | 100% |
| 0%  | 1 (referência)                          | 2   | 3    |
| 20%                                       | 4                                       | 5   | 6    |
| 30%                                       | 7                                       | 8   | 9    |
| 40%                                       | 10                                      | 11  | 12   |
| 50%                                       | 13                                      | 14  | 15   |

A determinação dos traços envolvendo cimento, cinza leve, cal hidratada, areia e cinza pesada baseou-se na substituição do cimento por cinza leve, em volume, correspondente a 0%, 20%, 30%, 40% e 50%, e na substituição da areia por cinza pesada, também em volume, correspondente a 0%, 50% e 100%.

Atentou-se para que a substituição do cimento pela cinza leve não ultrapassasse o limite de adição permitida pela norma para cimentos com adições pozolânicas, na qual se admite um máximo de 50% de substituição em massa (NBR 11578, 1991).

3.2.1 TRAÇOS

Utilizou-se o traço 1 : 2 : 9 (cimento : cal hidratada : areia seca) em volume, como base para todas as substituições.

A água necessária para produção das argamassas foi corrigida para atingir uma consistência de 255±10 mm, determinada na mesa de consistência “flow table”.

Da combinação entre argamassas confeccionadas com percentuais de substituição do cimento pela cinza leve (cinco teores) e da areia por cinza pesada (três teores), chegou-se ao total de 15 argamassas diferentes, as quais foram estudadas.

Na tabela 3.17, é apresentado um resumo de características físicas dos materiais componentes.

Tabela 3.17 - Características físicas dos materiais componentes das argamassas

| MATERIAIS          | Massa unitária MU (kg/dm³) | Massa específica ME (kg/dm³) | Fator de Empacotamento (MU/ME) | Módulo de finura MF | Dimensão Máxima Característica (mm) | Dimensão Mínima Característica (mm) |
|--------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Cimento Portland   | 1,11                       | 3,14                         | 0,35                           | -                   | -                                   | -                                   |
| Cal hidratada      | 0,72                       | 2,38                         | 0,30                           | -                   | -                                   | -                                   |
| Cinza leve         | 0,90                       | 1,97                         | 0,46                           | -                   | -                                   | -                                   |
| Areia composição 1 | 1,45                       | 2,62                         | 0,55                           | 2,50                | > 1,2                               | 0,15                                |
| Cinza pesada       | 0,56                       | 1,91                         | 0,29                           | -                   | > 1,2                               | < 0,075                             |



Tabela 3.18 - Argamassas – Traços em massa e em volume

| Argamassa<br>n° | Traços em Volume |     |     |       |     | Traços em massa |      |      |       |      |
|-----------------|------------------|-----|-----|-------|-----|-----------------|------|------|-------|------|
|                 | cim              | czl | cal | areia | czp | cim             | czl  | cal  | areia | czp  |
| 1               | 1                | 0   | 2   | 9     | 0   | 1               | 0    | 1,30 | 11,76 | 0    |
| 2               | 1                | 0   | 2   | 4,5   | 4,5 | 1               | 0    | 1,30 | 5,88  | 2,27 |
| 3               | 1                | 0   | 2   | 0     | 9   | 1               | 0    | 1,30 | 0     | 4,54 |
| 4               | 0,8              | 0,2 | 2   | 9     | 0   | 1               | 0,20 | 1,62 | 14,70 | 0    |
| 5               | 0,8              | 0,2 | 2   | 4,5   | 4,5 | 1               | 0,20 | 1,62 | 7,35  | 2,84 |
| 6               | 0,8              | 0,2 | 2   | 0     | 9   | 1               | 0,20 | 1,62 | 0     | 5,68 |
| 7               | 0,7              | 0,3 | 2   | 9     | 0   | 1               | 0,35 | 1,85 | 16,80 | 0    |
| 8               | 0,7              | 0,3 | 2   | 4,5   | 4,5 | 1               | 0,35 | 1,85 | 8,40  | 3,24 |
| 9               | 0,7              | 0,3 | 2   | 0     | 9   | 1               | 0,35 | 1,85 | 0     | 6,49 |
| 10              | 0,6              | 0,4 | 2   | 9     | 0   | 1               | 0,54 | 2,16 | 19,59 | 0    |
| 11              | 0,6              | 0,4 | 2   | 4,5   | 4,5 | 1               | 0,54 | 2,16 | 9,80  | 3,78 |
| 12              | 0,6              | 0,4 | 2   | 0     | 9   | 1               | 0,54 | 2,16 | 0     | 7,57 |
| 13              | 0,5              | 0,5 | 2   | 9     | 0   | 1               | 0,81 | 2,59 | 23,51 | 0    |
| 14              | 0,5              | 0,5 | 2   | 4,5   | 4,5 | 1               | 0,81 | 2,59 | 11,76 | 4,54 |
| 15              | 0,5              | 0,5 | 2   | 0     | 9   | 1               | 0,81 | 2,59 | 0     | 9,08 |

A tabela 3.18 mostra os 15 traços de argamassas em volume, com os respectivos traços em massa, considerando-se a massa unitária como fator de conversão.

3.2.2 PASTA DE CAL

Nesta pesquisa os traços correspondem aos materiais secos; contudo, com o objetivo de se aumentarem as reações de hidratação da cal, fez-se uma pasta de cal hidratada e água, na proporção de **1 : 0,8** em massa, com no mínimo 48 horas antes da mistura dos materiais de todas as argamassas usadas neste estudo.

Para a confecção dessa pasta, utilizou-se misturador mecânico; após a colocação de toda a água na cuba, acrescentava-se a cal para então se acionar o misturador em velocidade baixa por quatro minutos.

A pasta de cal era armazenada em sacos de polietileno duplos, entre 5 e 7 kg, com a finalidade de se evitar a perda d'água e o acesso de CO<sub>2</sub> do ar, provocando a carbonatação da pasta.

Após 48 horas de maturação, a pasta de cal era agitada manualmente durante um minuto, sem ser retirada dos sacos, para em seguida ser usada na preparação das argamassas.

### 3.2.3 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a preparação das argamassas desta pesquisa foram utilizados dois padrões diferentes.

1) Utilizando misturador mecânico descrito na NBR 7215 (1982) item 6.1.3, em que a mistura dos componentes seguiu os procedimentos descritos no item 6.2.3.2.b da mesma norma, com as seguintes alterações:

- i) inicialmente foram adicionadas a pasta de cal e a água na cuba;
- ii) depois foram adicionados o cimento e a cinza leve, marcando-se o tempo;
- iii) ao término da adição de cimento e de cinza leve, acionou-se o misturador em velocidade baixa, por trinta segundos;
- iv) iniciou-se, então, a adição de areia e cinza pesada por trinta segundos, com o misturador acionado;
- v) mudou-se para velocidade alta, permanecendo trinta segundos;
- vi) desligou-se o misturador e, com auxílio de uma espátula, foram removidos materiais segregados das laterais da cuba e da pá para o interior da cuba, deixando a mistura descansando por um minuto e trinta segundos;
- vii) imediatamente após esse tempo, ligou-se o misturador por mais um minuto em velocidade alta;
- viii) desligou-se o misturador, retirou-se a cuba e procedeu-se à medida de consistência na mesa de fluidez;
- ix) recolocou-se a argamassa da medida de consistência na cuba, misturou-se manualmente com auxílio de espátula e iniciou-se o preenchimento dos moldes.

Esse procedimento foi usado para confeccionar as argamassas utilizadas na maioria dos ensaios, exceção feita às argamassas produzidas para os ensaios de **absorção de água por capilaridade e por baixa pressão, retenção de água, exsudação e aderência à tração**, para os quais se utilizou o padrão (ii), descrito a seguir.

2) Utilizou-se misturador mecânico contendo cuba de aço inoxidável com capacidade aproximada de 20 litros, com pá tipo globo em aço inoxidável, que gira em torno de si mesmo e, em movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes dirigidos em sentidos opostos. A mistura dos componentes obedeceu aos mesmos procedimentos descritos anteriormente.

A justificativa do uso desse procedimento reside no fato de que a norma utilizada para ensaio de exsudação (RILEM MR-6) requer volume de 5 litros por batelada, sendo este

possível somente com o uso desse misturador de maior capacidade de mistura. As argamassas para os ensaios de absorção de água por capilaridade e retenção de água foram executadas com a mesma batelada, isto é, concomitantemente. Os ensaios de absorção de água por baixa pressão e aderência à tração foram executados sobre as mesmas amostras. Para estes, o uso do misturador de maior capacidade de mistura foi devido ao volume de argamassa necessária para aplicação nos substratos.

Uma vez produzidas as diferentes argamassas, foram realizados ensaios para avaliar o comportamento nos estados fresco e endurecido.

### **3.3 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO**

#### **3.3.1 TEOR DE ÁGUA**

Com o objetivo de se analisarem as argamassas de mesma trabalhabilidade sem usar aditivos, fixou-se a consistência.

De cada argamassa determinou-se o teor de água para atingir a consistência, por meio do ensaio na mesa de consistência (*flow table*), fixada em  $255 \pm 10$  mm, conforme NBR 13276 (1995).

Buscou-se a quantidade de água por tentativa, sendo que o teor de água final foi comprovado pelo ensaio de verificação, sem adições complementares de água.

#### **3.3.2 TEOR DE AR INCORPORADO**

O teor de ar incorporado na argamassa foi determinado de acordo com os procedimentos da NBR 13278 (1995) modificados.

A modificação básica consistiu na substituição do recipiente de PVC com 400 ml por 16 moldes cilíndricos de aço com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, com volume considerado constante e igual a 196,35 ml, em que o teor de ar incorporado obtido foi a média das determinações nas 16 amostras.

A moldagem desses cilindros obedeceu aos procedimentos da NBR 7215 (1982) – item 6.2.4.2.

### 3.3.3 RETENÇÃO DE ÁGUA

Com o objetivo de se determinar a capacidade de retenção de água das argamassas estudadas, foram utilizados os procedimentos da RILEM-MR 4. Os filtros utilizados possuíam gramatura de 239,69 g/m<sup>2</sup> e absorção de 209,87% , média de três amostras.

### 3.3.4 EXSUDAÇÃO

Para a medida de exsudação de água das diferentes argamassas, foram elaboradas novas dosagens com o mesmo traço e teor de água utilizados para confeccioná-las para todos os ensaios.

Foram utilizados os procedimentos de ensaio prescritos na norma RILEM-MR 6.

A retirada de água exsudada obedeceu ao seguinte procedimento:

- i) os béqueres de 600 ml contendo a argamassa permaneciam na vertical até o 14º minuto, quando então eram inclinados a 25% com a horizontal e permaneciam nesta posição até o final do ensaio;
- ii) a primeira medida era feita aos 15 minutos, com auxílio de uma seringa e de agulha na região onde se concentrava a água;
- iii) os béqueres permaneciam cobertos com um filme plástico entre as medições da água exsudada, para evitar sua evaporação.

### 3.3.5 TEMPOS DE PEGA

Foi executado ensaio com pasta de cimento, cal hidratada, cinza leve e cinza pesada, excluindo-se apenas a areia.

Embora a cinza pesada esteja substituindo o agregado pelas suas características pozolânicas (Cheriat *et al.*, 1999), ela foi incluída na pasta de cimento, cal e cinza leve para avaliar o comportamento de pega segundo a norma NBR 11581 (1991) – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.

Esse ensaio foi executado nas argamassas **1, 3, 13 e 15**, ou seja, a referência, sem qualquer substituição (**Argamassa 1**), aquela com 100% de cinza pesada em substituição à areia e nenhuma substituição do cimento (**Argamassa 3**), aquela com 50% de cinza leve em substituição ao cimento (percentual máximo estudado) e nenhuma substituição da areia (**Argamassa 13**) e a argamassa com 50% de substituição

do cimento por cinza leve e 100% de substituição da areia por cinza pesada (**Argamassa 15**).

Na escolha dessas argamassas para estudo dos tempos de pega, considerou-se que os tempos de fim de pega aumentam com o teor de cinza. Assim sendo, foram escolhidas as substituições extremas da CZL e da CZP isoladamente (**Argamassa 3** e **Argamassa 13**) e numa única argamassa (**Argamassa 15**), além da argamassa de referência (**Argamassa 1**), sem adição de cinzas.

Os procedimentos de ensaio foram os prescritos pela NBR 11581 (1991), sendo que o volume de argamassa preparada foi de 2 dm<sup>3</sup> para cada traço, e empregou-se a agulha de Vicat manual.

### **3.3.6 MASSA ESPECÍFICA**

Foram seguidos os mesmos procedimentos de determinação de dados que o ensaio de teor de ar incorporado, normalizados pela NBR 13278 (1995); alterou-se o volume do recipiente de 400 ml para 196,35 ml e a quantidade de amostras de 1 para 16.

## **3.4 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO**

### **3.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Com o traço dos materiais secos definido (tabela 3.18, pág. 56) e o teor de água definido em função da consistência-padrão, os materiais foram proporcionados em massa, utilizando-se balança com precisão de 0,1 g.

A mistura dos componentes seguiu os procedimentos da NBR 7215 (1982), item 6.2.3.2.b, com as alterações descritas anteriormente no item 3.2.3 (i).

A quantidade de material colocado no misturador foi suficiente para a moldagem de 8 corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm), necessitando, assim, duas bateladas para completar os 16 CPs necessários.

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em moldes metálicos cilíndricos de 50 mm de diâmetro e altura de 100 mm, conforme procedimentos de moldagem estabelecidos na NBR 7215 (1982), item 6.2.4.

Para evitar a evaporação da água da argamassa recém-moldada, colocou-se na face superior do molde uma plaqueta de vidro.

A cura foi realizada mantendo-se inicialmente os corpos-de-prova em ambiente de laboratório por 72 horas, quando foram desmoldados e inseridos em câmara úmida, com umidade relativa superior a 90% e temperatura de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até a data de seu rompimento, ou seja aos 7, 28, 60 e 90 dias de idade.

Na idade de rompimento, os corpos-de-prova foram pesados e foram medidos sua altura e seus diâmetros ortogonais no terço médio da altura, com auxílio de um paquímetro.

Em seguida, foram capeados com mistura de enxofre e cimento, em proporção **4 : 1** em volume, nas faces superior e inferior, conforme NBR 7215 (1982), item 6.2.8.1, para melhor distribuição dos esforços de rompimento.

Foram rompidos quatro corpos-de-prova de cada argamassa, nas idades de 7, 28, 60 e 90 dias. Para o rompimento, fixou-se a velocidade de deslocamento da mesa em 0,025 mm/s.

O corpo-de-prova era centrado no prato inferior da prensa e sobre ele foi posicionada uma rótula, em que o prato superior, também rotulado, transmitia a carga de compressão.

Os resultados dos rompimentos foram determinados de acordo com o item 5 da NBR 13279 (1995) – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão, que prevê um desvio relativo máximo de 6% dos valores individuais para a média das amostras rompidas.

### **3.4.2 MASSA ESPECÍFICA**

Os procedimentos da NBR 9778 (1987) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica,

foram adotados para a determinação da massa específica das argamassas no estado endurecido.

Para a produção das argamassas, usou-se o procedimento descrito no item 3.2.3.(i) e na moldagem dos corpos-de-prova foram usados moldes cilíndricos medindo 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo o fundo e as paredes internas revestidos com filme plástico para facilitar a desmoldagem, evitando-se o uso do óleo que poderia vedar os poros da superfície, dessa forma comprometendo os resultados.

Nesse procedimento, para a saturação do corpo-de-prova foi usada a imersão em água à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### **3.4.3 ÍNDICE DE VAZIOS**

Ensaio executado concomitantemente ao ensaio de massa específica no estado endurecido, conforme procedimentos da NBR 9778 (1987).

Foi utilizado o procedimento de imersão em água à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

A balança utilizada possui precisão de 0,001 g.

### **3.4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA**

#### **3.4.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO**

Os procedimentos utilizados neste ensaio foram os descritos pela NBR 9778 (1987) – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

Este ensaio foi executado em amostras nas quais os procedimentos e os resultados encontrados serviram de base para a definição da absorção, o índice de vazios e a massa específica no estado endurecido.

#### **3.4.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

A execução do ensaio de absorção de água por capilaridade teve por base os procedimentos da NBR 9779 (1987), com redução dos intervalos de medição das alturas

da franja capilar e massas, devido a elevada taxa de absorção observada nessas argamassas.

Adotou-se o seguinte procedimento:

- i) Foram usados moldes cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, revestidos internamente com filme plástico em substituição à película de óleo.
- ii) O enchimento dos moldes se deu em quatro camadas com 30 golpes de soquete, conforme os procedimentos da NBR 7215 (1982), item 6.2.4.2. Para se evitar a evaporação da água, utilizou-se uma plaqueta de vidro sobre a face superior do molde. Os corpos-de-prova (três por tipo de argamassa) permaneceram em ambiente de laboratório até completar 72 horas, quando foram desmoldados e levados à câmara úmida até o 28º dia.
- iii) As amostras foram secas em estufa ventilada à temperatura de  $40\pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 14 dias.
- iv) Resfriou-se as amostras em dessecador até a temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e determinou-se a massa.
- v) Os corpos-de-prova foram imersos em água (temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), sendo mantido constante o nível de  $5\pm 1$  mm acima da base. O recipiente atendeu aos requisitos da NBR 9779 (1987).
- vi) Foram determinadas a massa e a altura capilar em quatro geratrizes posicionadas ortogonalmente entre si, em intervalos de 30, 90, 150 e 210 minutos, contados a partir da imersão dos corpos-de-prova (a cada medição, a superfície dos corpos-de-prova era enxugada com toalha absorvente).
- vii) Romperam-se os corpos-de-prova à tração por compressão diametral (NBR 7222, 1983), sendo registradas a tensão de ruptura e a distribuição da ascensão capilar no interior do corpo-de-prova.

#### 3.4.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR BAIXA PRESSÃO (MÉTODO DO CACHIMBO)

Este ensaio consistiu em testar as argamassas aplicadas como revestimento em substrato de concreto, quando submetidas a um baixo gradiente hidráulico. Para tanto, o revestimento foi executado por um profissional da construção civil, a fim de melhor avaliar a trabalhabilidade deste.

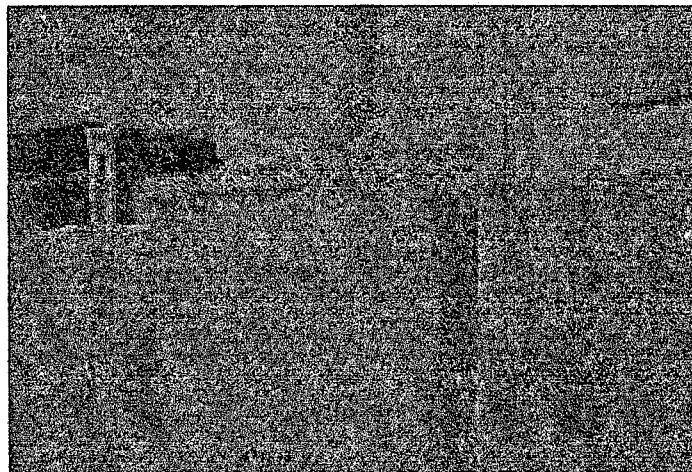
A espessura média do revestimento foi de 20 mm e foi executada da seguinte maneira:

- i) A argamassa foi aplicada três dias após ter sido aplicado o chapisco.
- ii) As áreas de aplicação das argamassas foram previamente delimitadas por mestras de madeira com 20 mm de altura.
- iii) Projetou-se a argamassa sobre o chapisco com auxílio de uma colher de pedreiro, distribuindo-a para assegurar a espessura de 20 mm.



- iv) Passou-se régua metálica apoiada nas mestras laterais, de baixo para cima, em movimentos de vai e vem para retirar o excesso de argamassa e deixar a superfície plana.
- v) A argamassa permaneceu em repouso até o momento em que o pedreiro “sentiu” a perda da consistência, quando desempenou a superfície da argamassa com auxílio de uma desempenadeira de madeira e uma trincha para umedecê-la, obtendo-se o revestimento acabado.

As paredes permaneceram em ambiente de laboratório até a realização do ensaio. Na idade de 35 dias, foram ensaiadas conforme o procedimento do CSTC/NIT-140, (1982), que consiste num aparato de vidro graduado em forma de cachimbo, com abertura superior por onde se preenche com água (reservatório), que ao ser fixado na superfície do revestimento de parede provoca infiltração da água durante determinado tempo de exposição. A pressão hidráulica variou entre 92 mm e 52 mm quando era completado o nível de água (figura 3.4).



**Figura 3.4 - Aparato para medir a absorção de água, montado na parede em estudo (método do cachimbo).**

As leituras eram feitas a cada minuto até o 15º, sendo que o resultado reflete a absorção verificada entre o 5º e o 15º minuto. Foram executadas quatro medições de absorção para cada tipo de argamassa utilizada no revestimento dos substratos.

### **3.4.5 ADERÊNCIA À TRAÇÃO**

O procedimento de ensaio obedeceu às prescrições da NBR 13528 (1995) – Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.

No ensaio de aderência à tração, a argamassa foi aplicada sobre chapisco, traço 1 : 3 (cimento CP I – S : areia grossa).

O chapisco foi aplicado sobre substrato constituído de painéis de concreto, com idade superior a um ano de hidratação. Para o arrancamento por tração, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro, sendo adotada a taxa de carregamento de 5 N/s.

O arrancamento foi assegurado por equipamento de tração hidráulica, e os dados foram obtidos por meio de dispositivo digital para leitura de carga.

### 3.4.6 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

A análise térmica diferencial foi realizada nas argamassas de números 1, 2 e 3, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e aos 91 dias.

As argamassas foram preparadas conforme procedimento descrito no item 3.2.3.(i), moldadas em cilindros com 30 mm de diâmetro e 45 mm de altura; os corpos-de-prova permaneceram nos moldes, com tampa, até a idade de 72 horas, quando foram desmoldados, envolvidos com filme plástico e armazenados em câmara úmida para cura. Nas idades do ensaio, desbastou-se 5 mm de espessura na camada externa do corpo-de-prova, sendo seu miolo triturado manualmente, seco à temperatura de  $70 \pm 10^\circ\text{C}$ , moído em moinho de bolas durante 90 segundos, peneirado na malha 150  $\mu\text{m}$ ; sendo utilizado para ensaio o material passante nessa peneira. Utilizou-se moinho de bolas marca Spex Certiprep, modelo 8000 Mixer/Mill, sendo que as esferas de aço foram em número de cinco, com diâmetro de 8 mm e massa de 2,5140 g, e uma com diâmetro de 16 mm e massa de 21,6852 g; o moinho de aço inoxidável possuía diâmetro interno com 33 mm e altura interna com 60 mm.

Uma vez preparada a amostra, utilizou-se o equipamento patenteado pelo INSA-Lyon para análise térmica diferencial. Tanto o cadinho porta-amostra, quanto o de referência eram de alumina, sendo o ensaio realizado em atmosfera ao ar, com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , até atingir a temperatura de  $900^\circ\text{C}$ . O material utilizado como referência foi o caulim calcinado. Cada amostra consistia numa massa representativa de 600 mg.

Registrou-se a curva da temperatura da amostra e comparou-se com a curva da temperatura de caulim calcinado de comportamento inerte. As diferenças de temperatura refletiram alterações físico-químicas na estrutura dos compostos das argamassas que foram analisadas.

#### 3.4.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Este ensaio, a exemplo do ensaio de Análise Térmica Diferencial (ATD), foi realizado com as argamassas **1, 2 e 3**, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 91 dias.

A produção, moldagem, desmoldagem e cura dos corpos-de-prova, bem como a preparação das amostras para ensaio, realizou-se concomitantemente ao ensaio de ATD.

Para caracterização de fases dos compostos contidos na argamassa, foram utilizadas amostras em pó, com granulometria inferior a 150  $\mu\text{m}$ , compactadas num porta-amostra. As condições de varredura foram: passo de **0,05°**, tempo de passo de **1** segundo e intervalo de medida, em **2 $\theta$** , de **5** a **60°**. A identificação das fases deu-se por intermédio do banco de dados do JCPDS.

O equipamento utilizado foi um difratômetro marca Rigaku, modelo Miniflex com radiação cobre (**Cu, K $\alpha$** ) possuindo comprimento de onda ( $\lambda$ ) igual a 1,5418 Å, do laboratório do Departamento de Física da UFSC.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas argamassas avaliadas quanto ao desempenho no estado fresco e endurecido, conforme descrito no capítulo 3.

Foi verificada a areia de melhor composição para a produção das argamassas.

Nas argamassas verificou-se a influência da incorporação das cinzas na relação água/aglomerante, nas propriedades de consistência e na resistência à compressão, sendo também avaliado o desempenho em uso dessas argamassas, quando aplicadas em substrato revestindo painel de concreto.

### **4.1 COMPOSIÇÃO DA AREIA**

Os resultados das composições das frações granulométricas (retidas nas peneiras # 0,15; 0,30; 0,60 e 1,20 mm) são apresentados na tabela 3.8, da página 51.

Não existe correlação linear entre a massa unitária e o módulo de finura das 17 composições da areia, conforme observado na figura 4.1; assim, o módulo de finura como indicativo de granulometria não pode ser utilizado para sugerir composições de agregados miúdos, visando o aumento da massa unitária. A explicação pode ser a desproporcionalidade entre as frações granulométricas utilizada para o cálculo do módulo de finura.

Dessas 17, seis composições foram escolhidas, sendo uma com massa unitária menor, uma com massa unitária média e quatro com massa unitária maior, que foram misturadas com 50% de cinza pesada (CZP), em volume, para definir aquela

composição que alcançasse a maior massa unitária com a CZP. Os resultados encontram-se na tabela 4.1.

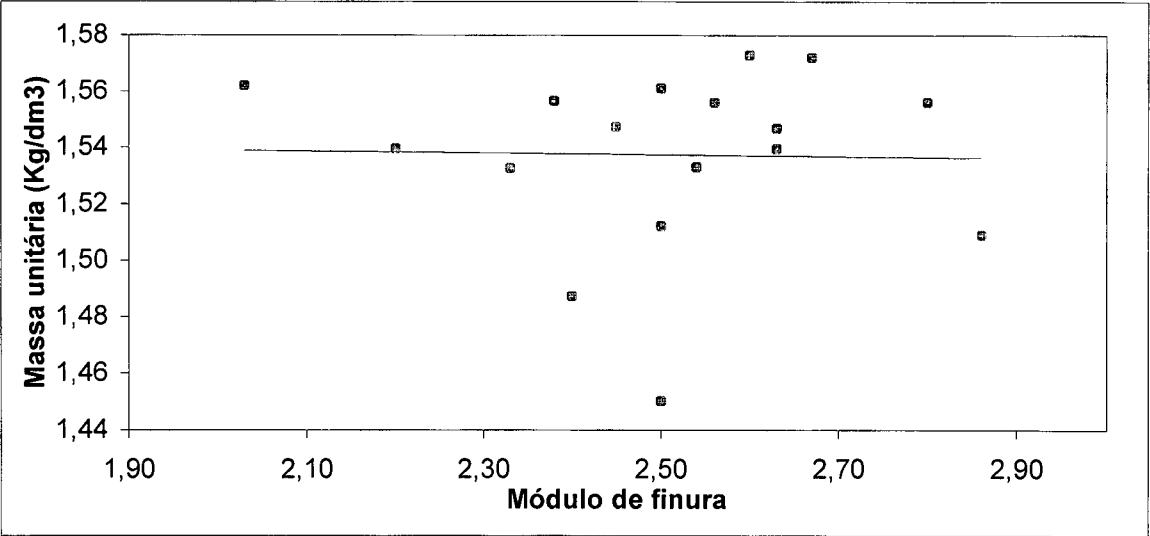


Figura 4.1 - Composições das frações de areia – Relação entre massa unitária e módulo de finura.

A areia escolhida para estudo foi a de número 1, correspondente à composição A, a qual possui frações iguais entre as quatro granulometrias, ou seja, material retido nas peneiras # 0,15; 0,30; 0,60 e 1,20 mm.

Tabela 4.1- Composições de areia-cinza pesada - Massa unitária

| Composição | Massa unitária MU (Kg/dm³) |                 |       |              | Fator de empacotamento (MU/ME) |
|------------|----------------------------|-----------------|-------|--------------|--------------------------------|
|            | Primeira amostra           | Segunda amostra | Média | Relativa (%) |                                |
| A          | 1,120                      | 1,153           | 1,137 | 100,0        | 0,479                          |
| B          | 1,116                      | 1,149           | 1,133 | 99,6         | 0,475                          |
| C          | 1,108                      | 1,137           | 1,123 | 98,8         | 0,471                          |
| D          | 1,095                      | 1,136           | 1,116 | 98,2         | 0,467                          |
| E          | 1,110                      | 1,124           | 1,117 | 98,3         | 0,468                          |
| F          | 1,116                      | 1,153           | 1,135 | 99,8         | 0,475                          |

A areia composta de menor massa unitária obteve, com a cinza pesada, a maior massa unitária. Isso pode ser atribuído à similaridade entre o tamanho dos vazios da areia e o tamanho dos grãos da cinza pesada, contribuindo para um maior fator de empacotamento.

Contudo, devido à pequena diferença entre as massas unitárias das misturas (**areia + CZP**), pode-se afirmar que, em proporções iguais (em volume), a granulometria da areia, previamente composta, não altera significativamente a massa unitária da mistura.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 TEOR DE ÁGUA

A tabela 4.2 mostra os resultados da demanda de água requerida por cada uma das argamassas confeccionadas para atender à consistência de 255±10 mm.

Os resultados da demanda de água encontram-se associados ao fator **a/c** (água/cimento), **a/agl.** (água/aglomerante), considerando-se o aglomerante constituído pela quantidade de cinzas e cimento Portland, e ao fator **a/mat.secos** (água/materiais secos), sendo os materiais secos constituídos pela quantidade total de agregados e de aglomerantes.

Todas as relações encontram-se apresentadas em massa e volume, para permitir uma melhor análise das substituições dos materiais pelas cinzas. A consistência característica é indicada na coluna denominada *flow*.

Tabela 4.2 - Teor de água das argamassas estudadas

| Argamassa<br>Nº | Teor (%) |     | Fator |        |                 |        |                 |        |             |        | Flow<br>(mm) |
|-----------------|----------|-----|-------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-------------|--------|--------------|
|                 | CZP      | CZL | a/c   |        | a/agl (sem czp) |        | a/agl (com czp) |        | a/mat.secos |        |              |
|                 |          |     | massa | volume | massa           | volume | massa           | volume | massa       | volume |              |
| 1               | 0        | 0   | 3,12  | 3,46   | 1,36            | 1,15   | 1,36            | 1,15   | 0,22        | 0,29   | 259          |
| 2               | 50       |     | 3,32  | 3,68   | 1,44            | 1,23   | 0,73            | 0,49   | 0,32        | 0,31   | 253          |
| 3               | 100      |     | 3,71  | 4,11   | 1,61            | 1,37   | 0,54            | 0,34   | 0,54        | 0,34   | 264          |
| 4               | 0        | 20  | 3,75  | 4,17   | 1,33            | 1,11   | 1,33            | 1,11   | 0,21        | 0,28   | 248          |
| 5               | 50       |     | 4,23  | 4,70   | 1,50            | 1,25   | 0,75            | 0,50   | 0,33        | 0,31   | 261          |
| 6               | 100      |     | 4,28  | 4,75   | 1,52            | 1,27   | 0,50            | 0,32   | 0,50        | 0,32   | 248          |
| 7               | 0        | 30  | 4,41  | 4,89   | 1,38            | 1,14   | 1,38            | 1,14   | 0,22        | 0,29   | 256          |
| 8               | 50       |     | 4,76  | 5,28   | 1,49            | 1,23   | 0,74            | 0,49   | 0,32        | 0,31   | 252          |
| 9               | 100      |     | 4,85  | 5,38   | 1,51            | 1,25   | 0,50            | 0,31   | 0,50        | 0,31   | 246          |
| 10              | 0        | 40  | 5,20  | 5,77   | 1,40            | 1,15   | 1,40            | 1,15   | 0,22        | 0,29   | 256          |
| 11              | 50       |     | 5,61  | 6,23   | 1,52            | 1,25   | 0,75            | 0,50   | 0,32        | 0,31   | 256          |
| 12              | 100      |     | 5,75  | 6,38   | 1,55            | 1,28   | 0,51            | 0,32   | 0,51        | 0,32   | 254          |
| 13              | 0        | 50  | 6,29  | 6,98   | 1,43            | 1,16   | 1,43            | 1,16   | 0,23        | 0,29   | 253          |
| 14              | 50       |     | 6,71  | 7,44   | 1,52            | 1,24   | 0,75            | 0,50   | 0,32        | 0,31   | 257          |
| 15              | 100      |     | 6,95  | 7,72   | 1,58            | 1,29   | 0,52            | 0,32   | 0,52        | 0,32   | 258          |

Para melhor análise da substituição dos materiais pelas cinzas, os teores de água são apresentados também em volume.

Os resultados da tabela 4.2 encontram-se plotados nos gráficos da figura 4.2. Da análise por regressão linear, conclui-se que:

- i) a relação água/cimento tem uma correlação linear importante com a substituição da areia por cinza pesada, porém  $R^2$  é inferior a 0,9 nas argamassas com 20 e 30% de cinza leve em substituição ao cimento. Nas argamassas com teor de CZL próximo de 20 ou 30% a substituição da areia por cinza pesada não altera significativamente o teor de água para a consistência adotada neste estudo ( $255 \pm 10$  mm);
- ii) em todas as argamassas observou-se uma correlação linear importante entre a relação água/cimento e a substituição do cimento pela cinza leve (0, 20, 30, 40 e 50%). Essa tendência é significativa devido à redução na quantidade de cimento, à medida que se incorpora cinza leve (CZL);
- iii) não foi observada uma correlação linear importante entre a relação água/aglomerantes (com CZP) e o percentual de cinza leve nas argamassas, possivelmente pela proximidade existente entre as curvas granulométricas do cimento e a cinza leve;
- iv) considerando-se a cinza pesada como aglomerante, ocorre a redução da relação água/aglomerantes, à medida que se substitui a areia pela cinza pesada (CZP);
- v) a relação água/aglomerantes (sem CZP) possui uma correlação linear significativa ( $R^2 > 0,90$ ) com o aumento da substituição da areia por cinza pesada, com exceção às argamassas com 20 e 30% de cinza leve;
- vi) nas argamassas com 100% de cinza pesada observou-se uma correlação linear nula entre a relação água/aglomerantes (sem CZP) e o teor de cinza leve. Já para as argamassas com 50% de cinza pesada, a correlação linear foi pouco significativa ( $R^2 = 0,87$ );
- vii) quando se analisa o teor de água na relação água/materiais secos, observa-se um nítido aumento na demanda de água, à medida que se substitui a areia por cinza pesada. Isso pode ter origem em dois fatos: o primeiro é a redução significativa da massa dos materiais, conforme se substitui a areia pela CZP, e o segundo é o aumento da finura e conseqüente aumento da superfície específica dos materiais, quando se procede a tais substituições;
- viii) também na análise do teor de água na relação água/materiais secos, o aumento da demanda d'água não é significativo quando se substitui o cimento por cinza leve; a superfície específica do cimento (Blaine  $345 \text{ m}^2/\text{kg}$ , Metha, 1994 p. 199) e da cinza leve (Blaine  $300\text{-}400 \text{ m}^2/\text{kg}$ , Malhotra e Metha, 1996 p. 26) é similar; porém, há uma diferença significativa entre as massas específicas, isto é, a CZL possui massa específica menor ( **$\text{ME} = 1,973 \text{ Kg/dm}^3$** ) que a do cimento ( **$\text{ME} = 3,14 \text{ Kg/dm}^3$** ), que pode ter sido compensada pelo melhor desempenho das formas arredondadas dos grãos na plasticidade das argamassas em comparação aos grãos irregulares do cimento.

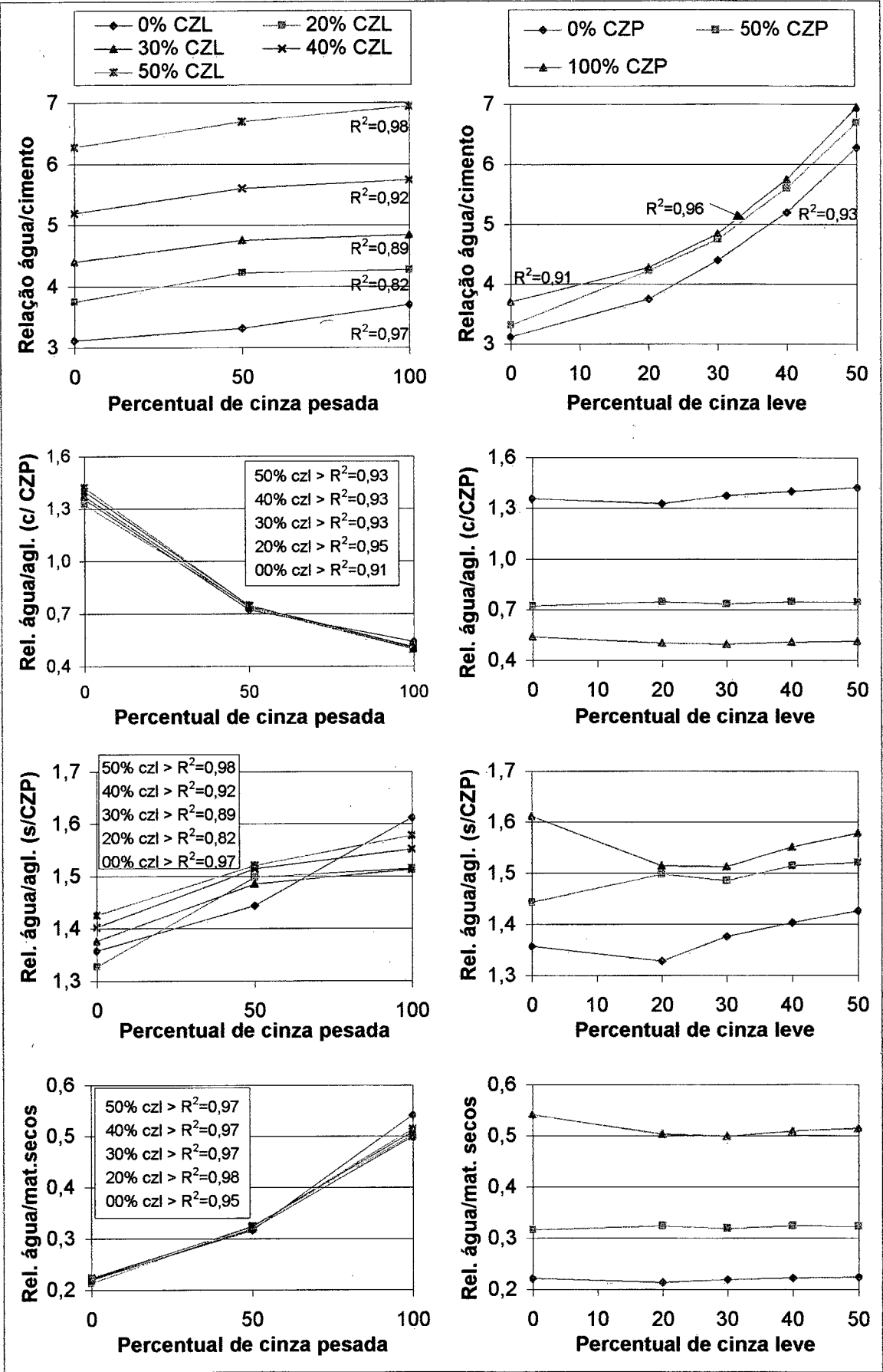


Figura 4.2 - Teor de água das argamassas em relação aos materiais constituintes (massa).



#### 4.2.2 TEOR DE AR INCORPORADO

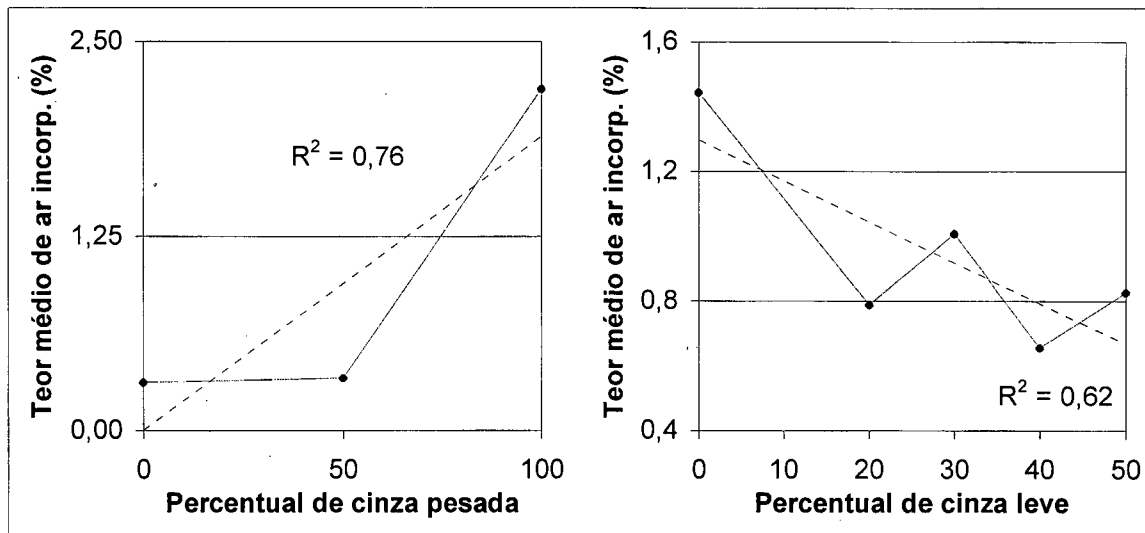


Figura 4.3 - Teor médio de ar incorporado entre as argamassas estudadas.

Neste ensaio constatou-se, conforme figura 4.3, que, com o aumento do teor de cinza pesada nas argamassas em substituição à areia, houve aumento do teor de ar incorporado.

Esse aumento foi de 8,5% na argamassa, com 50% de cinza pesada em relação à argamassa de referência, e 615% na argamassa, com 100% de cinza pesada em relação à argamassa de referência.

Esse fato pode ser justificado pelo tamanho dos grãos de cinza pesada ( $\varnothing_{\text{máx}} = 2 \text{ mm}$ ), superior ao diâmetro máximo da areia substituída ( $\varnothing_{\text{máx}} = 1,2 \text{ mm}$ ) e pela porosidade da cinza pesada devido à agregação de partículas, que por si só possui teor de ar importante.

Outro fator de aumento do teor de ar incorporado em argamassas com cinzas de carvão mineral é a capacidade das partículas de carvão incombusto existente nas cinzas de absorverem o ar, conforme citado por Malhotra e Mehta (1996).

Quando analisadas pelo teor de cinza leve, conforme figura 4.3, constata-se nas argamassas uma tendência de redução do teor de ar incorporado no intervalo de substituições de cimento por cinza leve estudado (entre 0 e 50%).

A redução do teor de ar incorporado com o aumento do teor de cinza leve nas argamassas é menos comum. Malhotra e Mehta (1996) mostraram que de 11 cinzas leves canadenses estudadas, apenas duas reduziram o teor de ar incorporado.

Embora observou-se uma tendência no teor de ar incorporado pela adição de cinzas, essa correlação linear não apresentou índice significativo.

#### 4.2.3 RETENÇÃO DE ÁGUA

No gráfico da figura 4.4 encontram-se os resultados dos ensaios de retenção de água realizados com as argamassas em estudo.

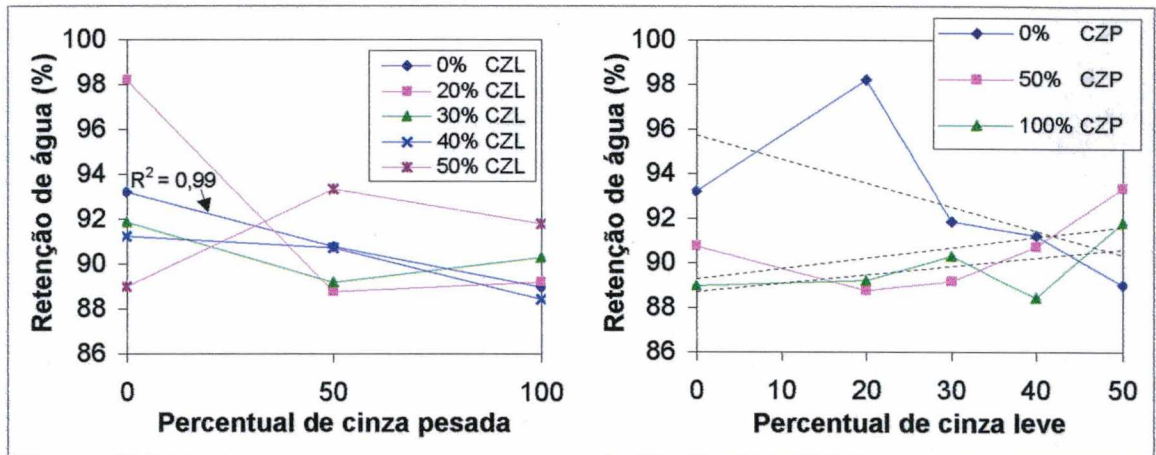


Figura 4.4 - Retenção de água de argamassas com teores de substituição de cinza leve e cinza pesada.

As linhas de tendência nas argamassas com teores constantes de cinza pesada mostram uma redução da retenção de água para as argamassas sem cinza pesada, e um aumento da retenção de água para as argamassas com 50 e 100% de cinza pesada, à medida que se aumenta a substituição de cimento por cinza leve, embora os coeficientes de correlação linear entre a retenção de água e os teores de cinza leve nas argamassas mostrem-se insignificantes.

Já os coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) entre a retenção de água e os teores de cinza pesada são significativos apenas nas argamassas sem cinza leve. Isso pode ser explicado pela forma irregular dos grãos de cinza pesada, absorvendo grande volume de água, mas sem capacidade de retenção, que, em presença de cinza leve, aumentam a capacidade de retenção de água.

É importante salientar que tanto a norma MR-4 da RILEM como a norma NBR 13277/95 não fixam o número de amostras para caracterizar a retenção das argamassas, e neste estudo os resultados são relativos a um ensaio para cada argamassa estudada, podendo ser este fato a explicação pela dispersão dos resultados.

As argamassas confeccionadas com incorporação da cinza pesada em substituição à areia apresentaram uma capacidade de retenção de água inferior à argamassa com areia convencional. Todavia, os valores de retenção de água estão acima de 75% (ASTM), valor este que classifica as argamassas como sendo de boa capacidade de retenção de água.

#### 4.2.4 EXSUDAÇÃO

A exsudação foi analisada em todas as argamassas, conforme procedimentos descritos pela norma RILEM MR-6, cujos resultados são mostrados nos gráficos da figura 4.5, onde se observa que:

- i) a cinza leve reduziu a exsudação nas argamassas sem cinza pesada e a menor exsudação foi observada na argamassa com 20% de cinza leve;
- ii) quando se substituiu areia por 50% de cinza pesada, aumentou-se a exsudação com o aumento da cinza leve. Os melhores desempenhos ocorreram nas argamassas com 0% e 20% de cinza leve;
- iii) nas argamassas com 100% de cinza pesada, aquela que apresentou menor exsudação foi a com 0% de cinza leve. Nesse grupo, encontrou-se a argamassa com o pior desempenho de exsudação, a qual possuía 30% de cinza leve;
- iv) analisando-se as argamassas sem cinza leve, observou-se que a que possuía 50% de cinza pesada apresentou melhor desempenho, o que mostra que, para substituições parciais de areia por cinza pesada, reduz-se a exsudação nessas argamassas;
- v) o contrário foi observado nas argamassas com teores de cinza leve de 20%, 30%, 40% ou 50%, em que para qualquer (50% ou 100%) teor de cinza pesada aumentou-se a exsudação, especialmente na argamassa com 30% de cinza leve e 100% de cinza pesada;
- vi) com exceção dessa argamassa, todas as demais apresentaram exsudação inferior à argamassa de referência;
- vii) a cinza pesada em substituição à areia contribui para uma maior exsudação de água;
- viii) o valor médio da quantidade de água exsudada foi atingido aos 60 minutos.



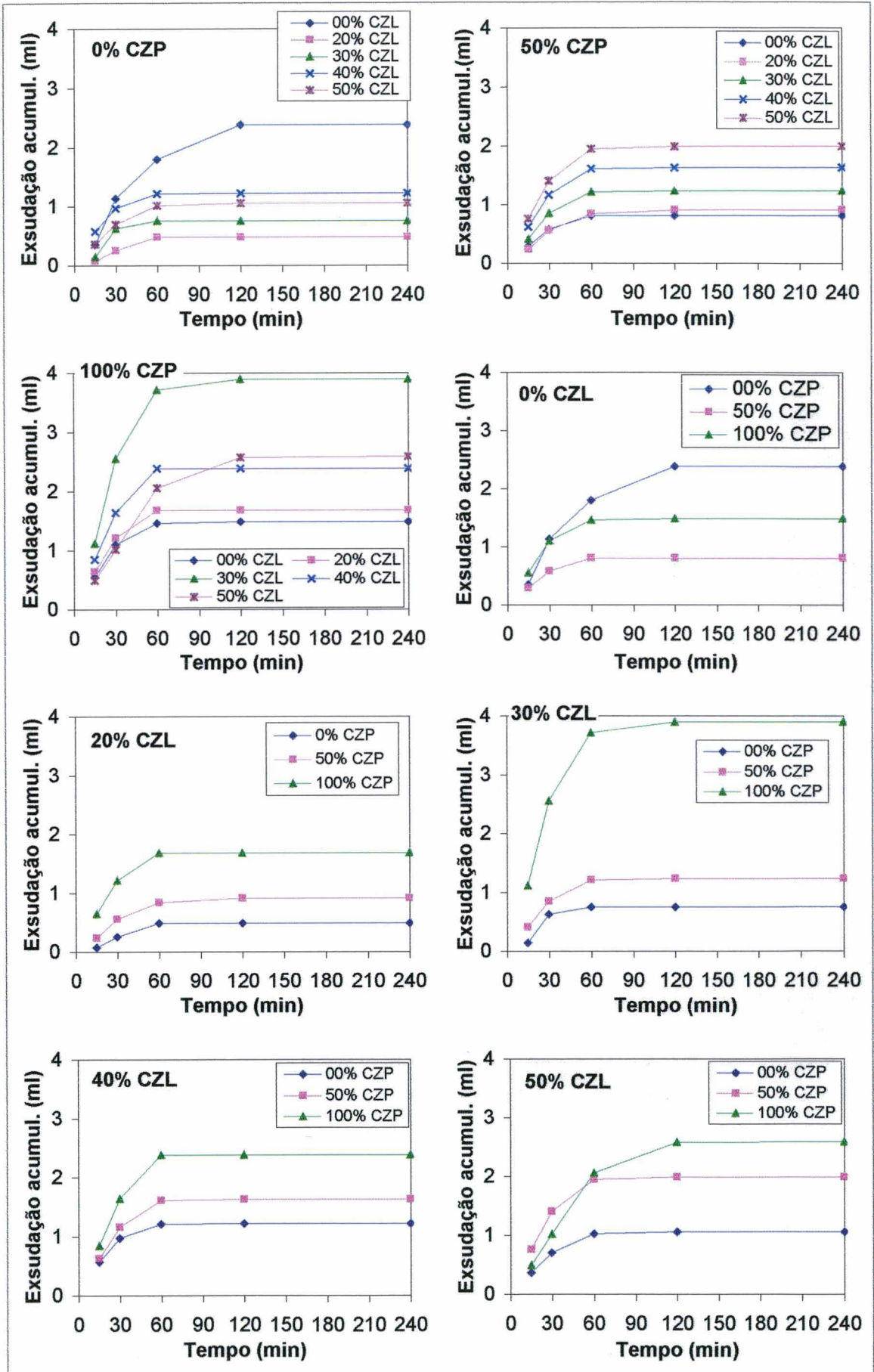


Figura 4.5 - Exsudação acumulada em função do tempo por teores de substituição.

A argamassa 15, com 100% de cinza pesada e 50% de cinza leve, foi a única na qual se observou alguma exsudação aos 240 minutos; foi também aquela que apresentou maior tempo de início de pega (7:15h). Se for comparado o teor de água/materiais secos com a argamassa de referência (0,22-massa; 0,29-volume) e essa argamassa (0,52-massa; 0,32-volume), observa-se que houve acréscimo no teor de água, e que mesmo assim houve redução da exsudação.

Observou-se também que nas argamassas sem cinza leve, a substituição de areia por cinza pesada reduziu a exsudação. Já nas argamassas com algum teor de cinza leve, a substituição de areia por cinza pesada aumentou a exsudação.

Uma hipótese é que, após a mistura das argamassas, por possuir poros na sua estrutura a cinza pesada continua absorvendo água; quando há presença de cinza leve, esta acaba por fechar a estrutura de poros da cinza pesada, impossibilitando a absorção tardia de água pela CZP e ocasionando o aumento da exsudação.

4.2.5 TEMPO DE PEGA

Os ensaios para determinar os tempos de início e fim de pega foram executados em quatro argamassas, contemplando os limites superiores e inferiores das substituições, cujos resultados são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tempos de pega das argamassas com teores-limite de cinzas

| Argamassa<br>nº | Teores de cinza (%) |     | Tempos de Pega (h:m) |          |       |          |       |          |
|-----------------|---------------------|-----|----------------------|----------|-------|----------|-------|----------|
|                 | CZL                 | CZP | Início               | relativo | Fim   | relativo | Total | relativo |
| 1               | 0                   | 0   | 01:50                | 1,00     | 04:10 | 1,00     | 02:20 | 1,00     |
| 3               | 0                   | 100 | 05:30                | 3,00     | 20:10 | 4,84     | 14:40 | 6,29     |
| 13              | 50                  | 0   | 02:20                | 1,27     | 05:20 | 1,28     | 03:00 | 1,29     |
| 15              | 50                  | 100 | 07:15                | 3,95     | 27:40 | 6,64     | 20:25 | 8,75     |

Este ensaio foi executado nas argamassas 1, 3, 13 e 15, isto é, a referência, sem qualquer substituição (1), aquela com 100% de cinza pesada em substituição à areia e nenhuma substituição do cimento (3), aquela com 50% de cinza leve em substituição ao cimento (percentual máximo estudado) e nenhuma substituição da areia (13) e aquela com 50% de substituição do cimento por cinza leve e 100% de substituição da areia por cinza pesada (15).

Os teores de água dessas argamassas foram redefinidos devido à exclusão da areia na composição. Foram baseadas na consistência-padrão para este ensaio, conforme NBR 11581, de 1991.

Como pode ser observado na tabela 4.3, as cinzas retardaram o início e o fim de pega, bem como aumentaram o período de pega das argamassas estudadas.

A cinza leve em seu teor máximo de substituição aumentou os tempos de pega na ordem de 30%, com base nos tempos da argamassa de referência.

Já a cinza pesada aumentou o início de pega em 200% e o período em 529% em relação à argamassa de referência.

Ravina (1997) afirmou que o efeito retardador da cinza leve pode ser atribuído ao fato de que a fase água-solúveis (gel) como sulfatos alcalinos geralmente se depositam sobre a superfície das partículas de cinza leve, caracterizando-se como retardador mais efetivo que uma equivalente quantidade de gesso.

Outro fator que influi nos tempos de pega é o teor de carbono incombusto, visto que quanto maior, mais demora a pega. Os teores de carbono orgânico dessas cinzas são significativos, 2,08% na cinza leve e 3,53% na cinza pesada, justificando o comportamento observado.

#### **4.2.6 MASSA ESPECÍFICA**

Observa-se no gráfico da figura 4.6 que a correlação linear entre a massa específica das argamassas e o percentual de cinza leve não é significativo; já a correlação linear entre a massa específica e o percentual de cinza pesada está próximo da unidade ( $R^2 > 0,99$ ) em todos os teores de cinza leve estudados.

A substituição de areia por cinza pesada promoveu redução de 25% na massa específica das argamassas no estado fresco (ver tabela 4.4) que corresponde à argamassa sem cinza leve.



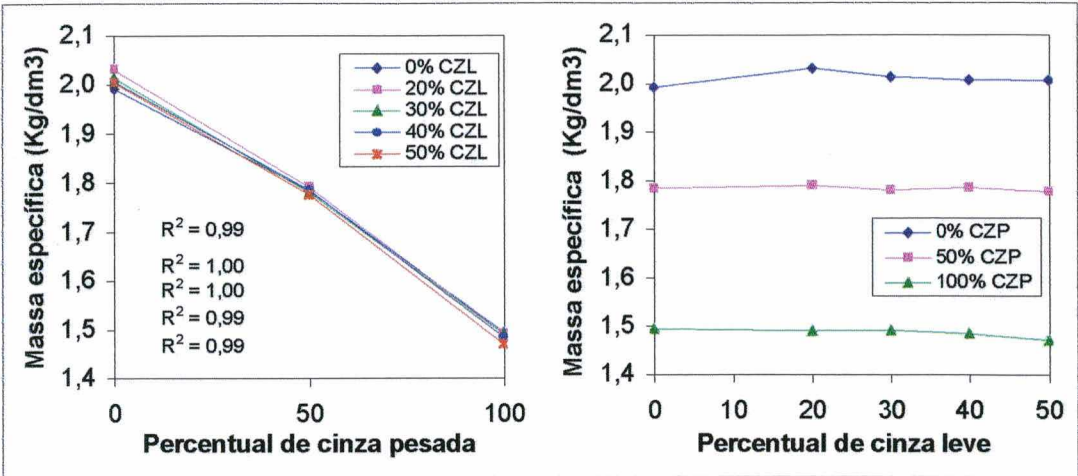


Figura 4.6 - Massa específica das argamassas no estado fresco em relação ao teor de cinzas (valores médios).

A substituição do cimento por cinza leve promove redução de massa de 19% no volume substituído, enquanto que na substituição de areia por cinza pesada essa redução é de 61% na massa do volume substituído. Esses números correspondem à comparação das massas unitárias.

Outro aspecto importante nesta análise para justificar a maior influência da cinza pesada na massa específica dessas argamassas é a superior participação no volume total da argamassa: CZL no máximo 3% e a CZP no máximo 45%, portanto significativamente superior.

Tabela 4.4 - Massa específica das argamassas no estado fresco

| Argamassa No. | % CZL | % CZP | Número de amostras | Massa específica (Kg/dm³) | Desvio padrão (Kg/dm³) | C.V.(%) | Redução da massa específica (%) |
|---------------|-------|-------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------|---------------------------------|
| 1             | 0     | 0     | 41                 | 1,9935                    | 0,0246                 | 1,23    | 0,00                            |
| 2             |       | 50    | 16                 | 1,7861                    | 0,0077                 | 0,43    | 10,40                           |
| 3             |       | 100   | 16                 | 1,4953                    | 0,0135                 | 0,90    | 24,99                           |
| 4             | 20    | 0     | 24                 | 2,0325                    | 0,0262                 | 1,29    | -1,96                           |
| 5             |       | 50    | 24                 | 1,7925                    | 0,0106                 | 0,59    | 10,08                           |
| 6             |       | 100   | 16                 | 1,4922                    | 0,0081                 | 0,55    | 25,14                           |
| 7             | 30    | 0     | 24                 | 2,0147                    | 0,0115                 | 0,57    | -1,07                           |
| 8             |       | 50    | 16                 | 1,7817                    | 0,0100                 | 0,56    | 10,62                           |
| 9             |       | 100   | 16                 | 1,4926                    | 0,0073                 | 0,49    | 25,13                           |
| 10            | 40    | 0     | 24                 | 2,0084                    | 0,0173                 | 0,86    | -0,75                           |
| 11            |       | 50    | 24                 | 1,7872                    | 0,0134                 | 0,75    | 10,35                           |
| 12            |       | 100   | 24                 | 1,4860                    | 0,0091                 | 0,61    | 25,46                           |
| 13            | 50    | 0     | 24                 | 2,0068                    | 0,0115                 | 0,57    | -0,67                           |
| 14            |       | 50    | 16                 | 1,7780                    | 0,0104                 | 0,58    | 10,81                           |
| 15            |       | 100   | 16                 | 1,4720                    | 0,0081                 | 0,55    | 26,16                           |

Nas argamassas sem cinza pesada, observou-se um pequeno aumento da massa específica, que pode ser explicado pela redução do teor de ar incorporado induzido pela cinza leve, conforme gráfico da figura 4.3. Assim, constata-se que a massa específica é também influenciada pelo teor de ar incorporado.

Isso pode ser ratificado quando se compara o desempenho das argamassas com 100% de substituição da areia por cinza pesada. Além da redução da massa do agregado, observa-se que nas argamassas com 100% de cinza pesada o teor de ar incorporado é sete vezes superior às argamassas com 0% e 50% de cinza pesada.



4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As resistências à compressão das argamassas nas quatro idades estudadas foram agrupadas no gráfico esquematizado na figura 4.7.

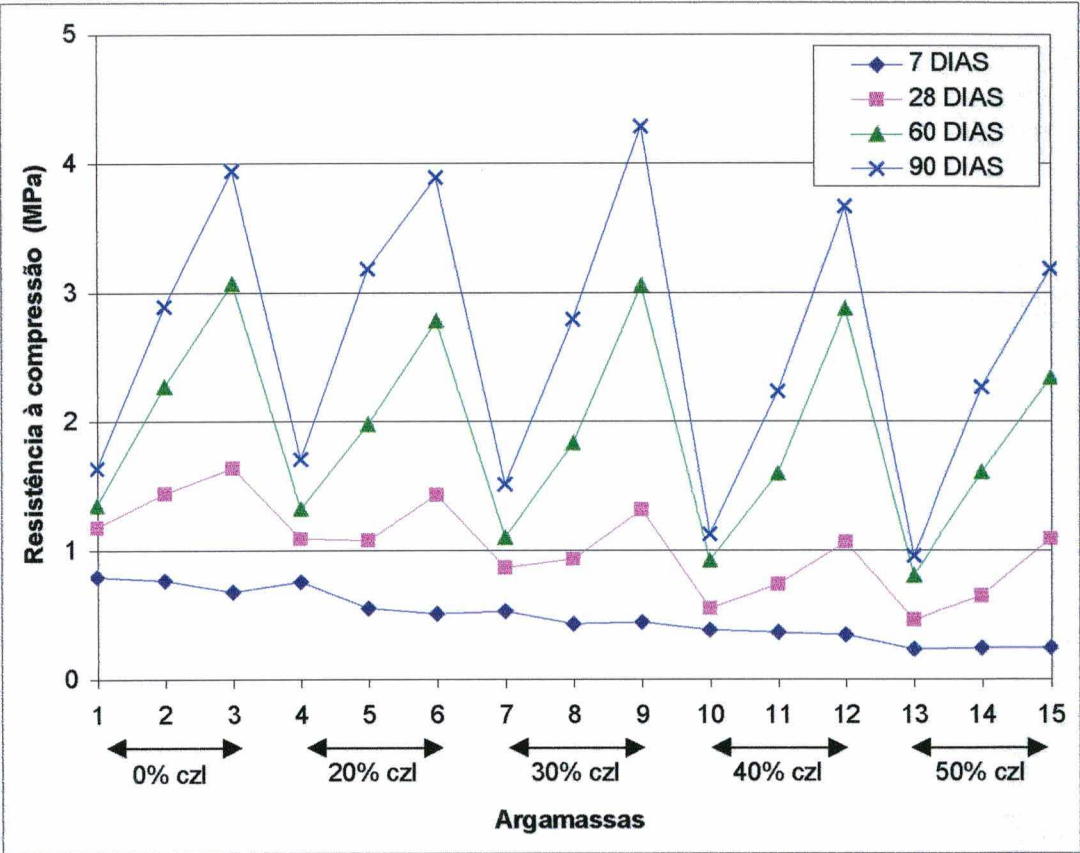


Figura 4.7 - Resistências à compressão das argamassas, nas quatro idades investigadas.

No gráfico acima, os picos relativos às idades de rompimento à compressão aos 28, 60 e 90 dias correspondem às argamassas com substituição de 100% de areia por cinza pesada; os pontos intermediários correspondem às argamassas com 50% de cinza pesada; e os pontos mais baixos correspondem às argamassas estudadas sem cinza pesada.

Nas abcissas encontra-se o número de cada argamassa confeccionada, conforme numeração estabelecida na tabela 3.18 da página 56.

Na figura 4.8, pode-se observar com mais detalhes a evolução da resistência à compressão em função do tempo de cura, onde as argamassas estão separadas por teores de substituição das cinzas (leve e pesadas).

Na tabela A-1 do anexo encontra-se o resultado da análise estatística dos valores dos ensaios de rompimento das amostras à compressão.

Todas as argamassas com 100% de cinza pesada obtiveram desempenho superior às argamassas com 0% e 50% de cinza pesada em substituição à areia, a partir do 28º dia, alcançando no 60º e 90º dias de cura resistências próximas ao dobro da resistência das argamassas sem cinza pesada.

As argamassas com 50% de cinza pesada obtiveram resistência similar à argamassa sem cinza pesada aos 28 dias e situando-se em patamar intermediário de resistência (entre as argamassas com 0% e 100% de cinza pesada) no 60º e 90º dia.

O melhor desempenho de resistência ocorreu com a argamassa 9, isto é, 100% de substituição da areia por cinza pesada e 30% de substituição de cimento por cinza leve, ultrapassando a resistência da argamassa com 100% de cinza pesada e 0% de cinza leve a partir do 60º dia.

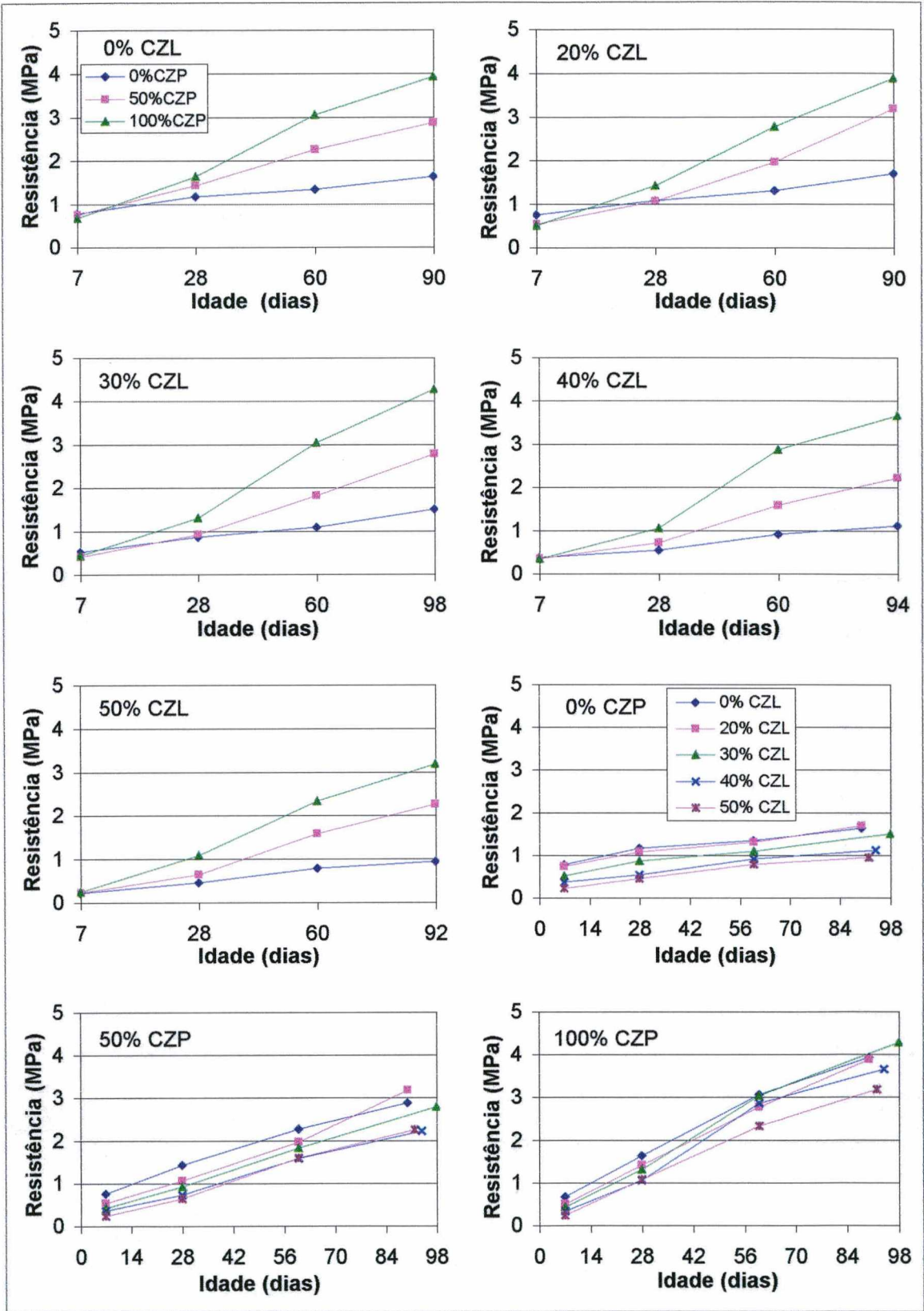


Figura 4.8 - Resistência média à compressão das argamassas, nas idades estudadas.

Observa-se que à medida que se substitui o cimento por cinza leve, as argamassas tendem a reduzir a resistência; no entanto, a argamassa com 50% de CZP e 20% de CZL



alcançou resistência superior a 0% de CZL com o mesmo teor de cinza pesada aos 90 dias, e as argamassas com 0%, 20% e 30% de CZL e 100% de CZP alcançaram resistências similares aos 90 dias.

Assim, conclui-se que a substituição progressiva da areia por cinza pesada traz incrementos de resistências proporcionalmente a partir do 28º dia.

Já a substituição de cimento por cinza leve alcançou resistências similares à argamassa de referência no teor de 20%, em argamassas com 0% e 50% de cinza pesada. Porém, com a substituição total da areia por cinza pesada, as argamassas com 0%, 20% e 30% de cinza leve alcançaram resistências similares.

Portanto, a substituição de cimento por cinza leve não melhora a resistência das argamassas nas idades investigadas, mas pode trazer economia de custo para substituições de até 30% de cimento.

As curvas de evolução da resistência ilustram ainda a influência da reatividade das cinzas pesadas. As argamassas confeccionadas sem cinza pesada, somente com o cimento CP I S-32 e areia (0% CZP), apresentam um patamar a partir dos 28 dias, ao contrário das argamassas com substituição de areia pela cinza pesada (50% e 100% CZP), que apresentaram crescimento de resistência após 60 dias de cura.

#### 4.3.2 MASSA ESPECÍFICA

O teor de incorporação de cinza pesada na argamassa apresenta uma correlação linear significativa ( $R^2 > 0,96$ ) com a massa específica das argamassas no estado endurecido, cuja tendência é justificada pela diferença que há entre a massa específica da areia ( $ME = 2,6181 \text{ Kg/dm}^3$ ) e a da cinza pesada ( $ME = 1,911 \text{ Kg/dm}^3$ ), conforme pode ser observado no gráfico da figura 4.9.

Nesse ensaio, realizado em amostras com 31 dias de idade, ratificou-se o que se caracterizou no ensaio de massa específica no estado fresco, isto é, o ar incorporado nas argamassas frescas com cinza pesada aqui apresenta a mesma tendência, agora caracterizada pelo índice de vazios.

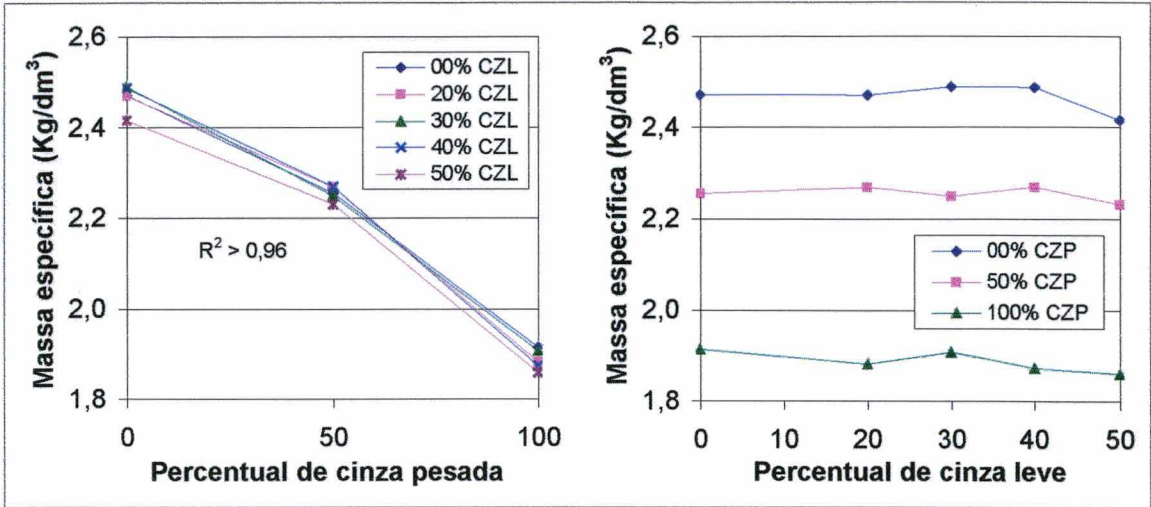


Figura 4.9 - Massa específica real das argamassas, em função dos teores de cinzas.

À medida que se substituiu o cimento por cinza leve, não se observou correlação linear importante com a massa específica.

4.3.3 ÍNDICE DE VAZIOS

O índice de vazios das argamassas no estado endurecido é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

Neste estudo, o índice de vazios foi determinado para amostras com 28 dias de cura, mais três dias secando em estufa.

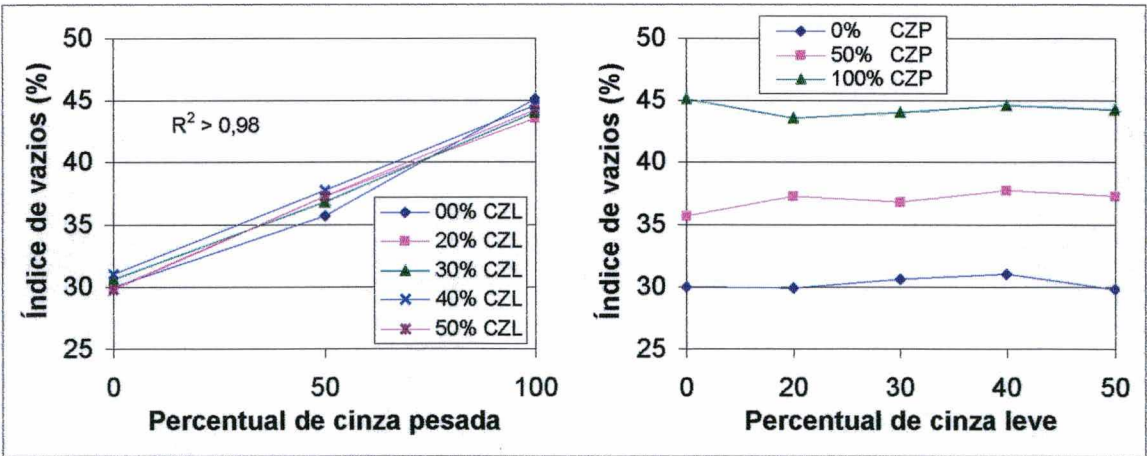


Figura 4.10 - Índice de vazios das argamassas no estado endurecido.

Nos gráficos da figura 4.10 constata-se que existe uma correlação linear importante entre o percentual de cinza pesada e o índice de vazios, sendo insignificante a correlação linear do índice de vazios e o percentual de cinza leve.

Ressalta-se que os principais fatores que podem influenciar o índice de vazios de uma argamassa são o teor de água, envolvendo relação água/materiais secos, exsudação e retenção de água, entre outros, e o teor de ar incorporado. O ar incorporado na argamassa fresca por si só aumenta o índice de vazios na argamassa endurecida; o teor de água dá idéia dos vazios que ficarão na argamassa endurecida após a evaporação da água capilar ou livre e a água adsorvida.

Na figura 4.11, comparou-se o índice de vazios das argamassas classificadas pelo teor de cinza pesada com a relação água/materiais secos dessas argamassas, em volume. Com exceção da argamassa nº 3, que apresentou a relação água/materiais secos um pouco acima das demais argamassas (*Flow* no limite superior do estabelecido), as demais argamassas apresentaram resultados muito similares para cada percentagem de substituição de areia por cinza pesada.

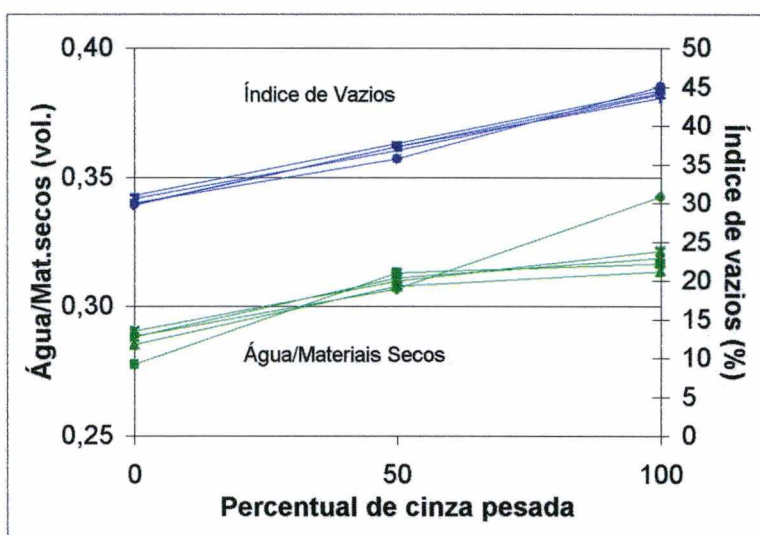


Figura 4.11 - Relação água/materiais secos e índice de vazios em função do teor de cinza pesada das argamassas em estudo.

Observa-se que nas argamassas sem cinza pesada e com 50% de cinza pesada, as curvas do índice de vazios e da relação água/materiais secos permaneceram paralelas, indicando que o índice de vazios aumentou proporcionalmente ao teor de água/materiais secos.

Já nas argamassas com 100% de cinza pesada essa diferença aumentou, isto é, o aumento do teor de água foi menor que o aumento do índice de vazios.



Isso pode significar que houve um aumento relativo do teor de ar incorporado nas argamassas com 100% de cinza pesada, compensando a redução relativa do teor de água/materiais secos, assim mantendo a tendência constante em aumentar o índice de vazios com o acréscimo de cinza pesada.

#### 4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

##### 4.3.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

É definida pelo índice entre a massa de água absorvida pela amostra e a massa seca dessa amostra, aos 31 dias de idade.

Os resultados encontram-se na figura 4.12, onde o índice de absorção é avaliado tanto pela relação em massa como pela relação volumétrica.

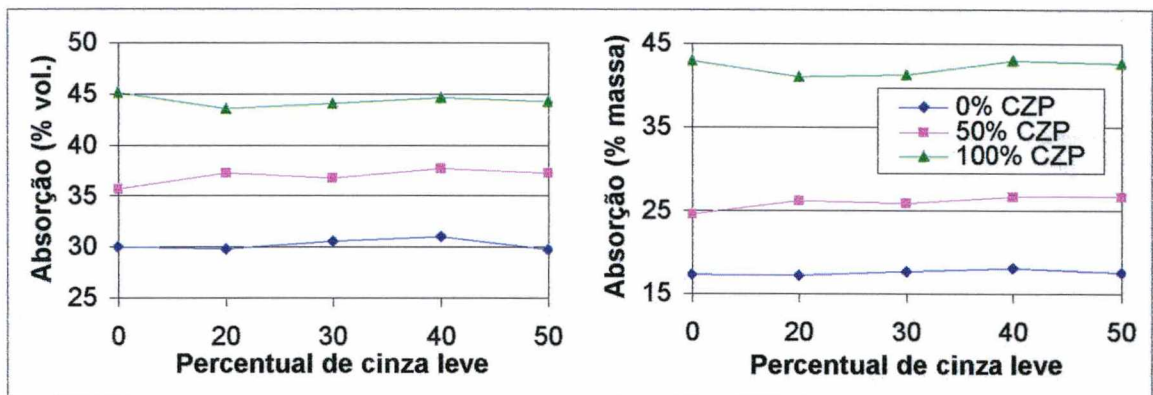


Figura 4.12 - Absorção de água por imersão, nas argamassas classificadas pelo teor de cinza leve.

Houve um acréscimo na absorção de água (volume) de 22% (valor médio), quando se substituiu 50% de areia por cinza pesada, e de 20%, quando se substituiu toda a areia pela cinza pesada. Como o volume de água absorvida é proporcional à substituição de areia por cinza pesada, pode-se dizer que os vazios existentes na argamassa são poros permeáveis deixados pela cinza pesada. Esses poros podem ter sido originados pela evaporação da água capilar e pelo ar incorporado.

Quando se compara a absorção por imersão dessas argamassas com o teor de cinza leve em substituição ao cimento, observa-se que não há variação na absorção de água.

Os gráficos comparam a absorção de água das argamassas em volume e massa; o desempenho medido pelo volume mostra a absorção absoluta, pois não leva em consideração a massa específica dos materiais; já o medido em massa, evidencia a absorção devido às diferenças significativas das massas específicas dos materiais, especialmente a existente entre a areia ( $ME = 2,62 \text{ Kg/dm}^3$ ) e a da cinza pesada ( $ME = 1,91 \text{ Kg/dm}^3$ ).

#### 4.3.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio foi realizado em amostras de argamassas com idade de 42 dias, sendo 28 dias de cura em câmara úmida mais 14 dias em estufa à  $40 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Para a verificação da influência da presença das cinzas na absorção de água por capilaridade foram plotados os gráficos apresentados na figura 4.13, cuja absorção foi a medida total ao final de 210 minutos. A absorção por capilaridade das argamassas mostra a mesma tendência observada nos ensaios de imersão, isto é, a correlação linear importante se dá com o teor de cinza pesada. Já a correlação linear entre o teor de cinza leve e a absorção por capilaridade é insignificante.

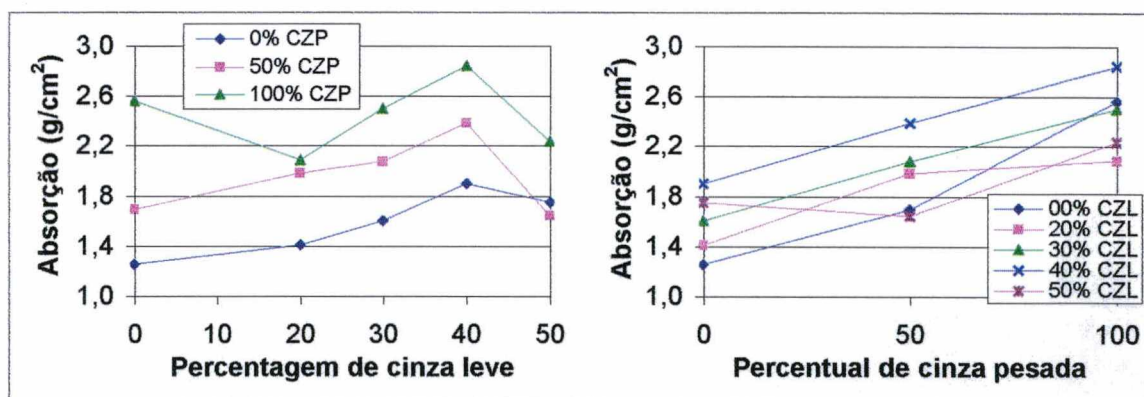


Figura 4.13 - Absorção de água por capilaridade nas argamassas, pelo teor de cinzas.

Também foi observado influência do teor de cinzas na absorção de água em função do tempo, comprovando a maior velocidade de absorção em argamassas com teores superiores de cinza pesada, conforme gráfico da figura 4.14.



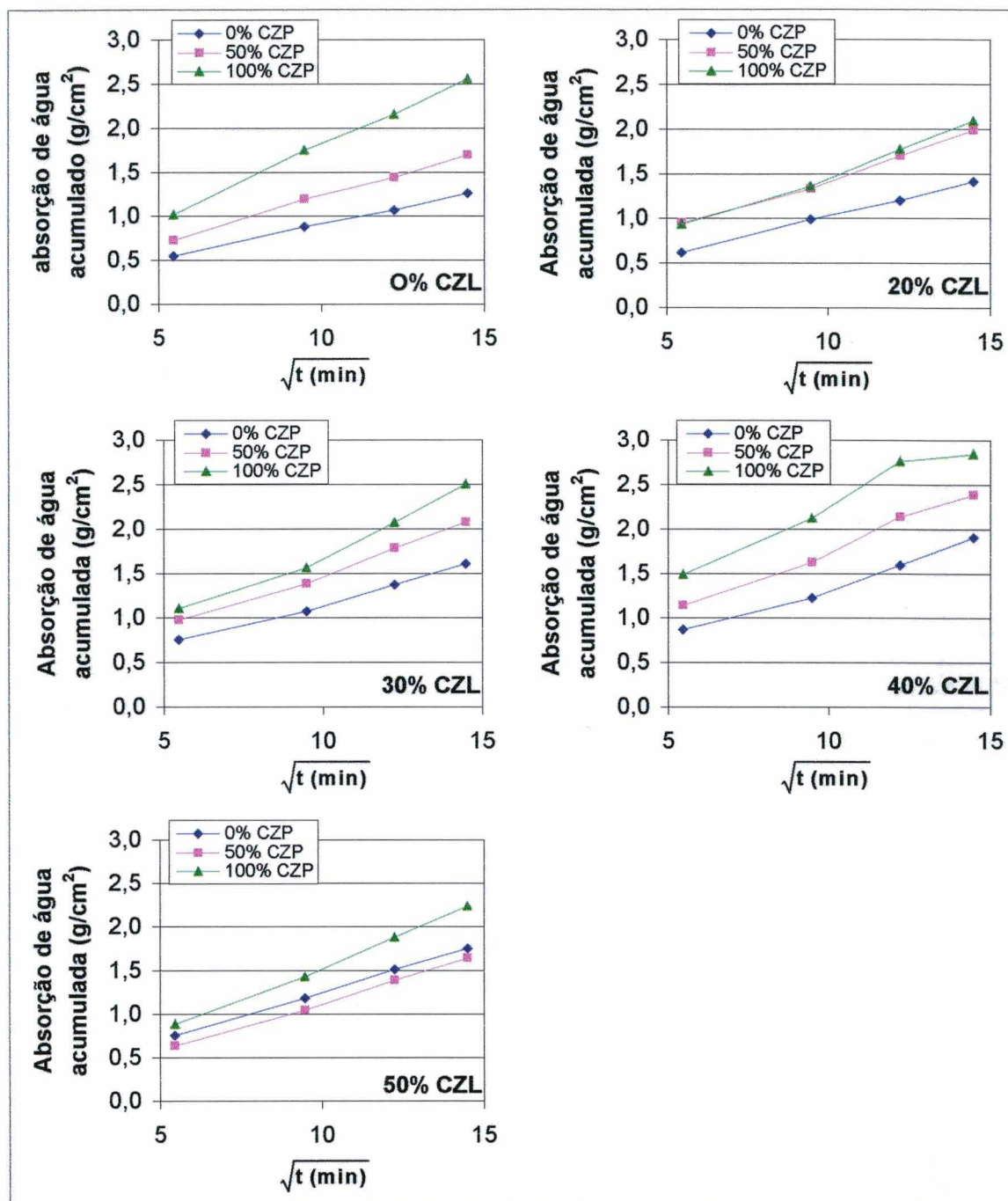


Figura 4.14 - Absorção de água das argamassas por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo.

A franja capilar final pode ser observada no gráfico da figura 4.15, onde se tem uma visão geral da média da altura capilar dos três corpos-de-prova de cada argamassa estudada.

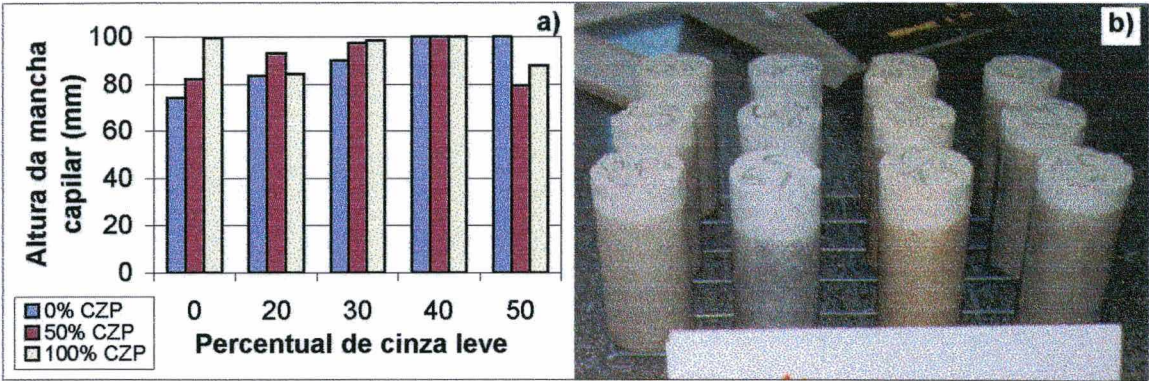


Figura 4.15 – a) Altura capilar média das argamassas; b) Corpos-de-prova: argamassas 5, 6, 7 e 8.

4.3.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR BAIXA PRESSÃO

Essa propriedade apresentou correlação linear importante nas argamassas com teores de 0%, 40% e 50% de cinza leve; a primeira argamassa reduziu a absorção com o aumento da cinza pesada, enquanto que as outras duas aumentaram a absorção com o aumento do teor de cinza pesada. Este ensaio foi realizado em amostras com 35 dias de idade.

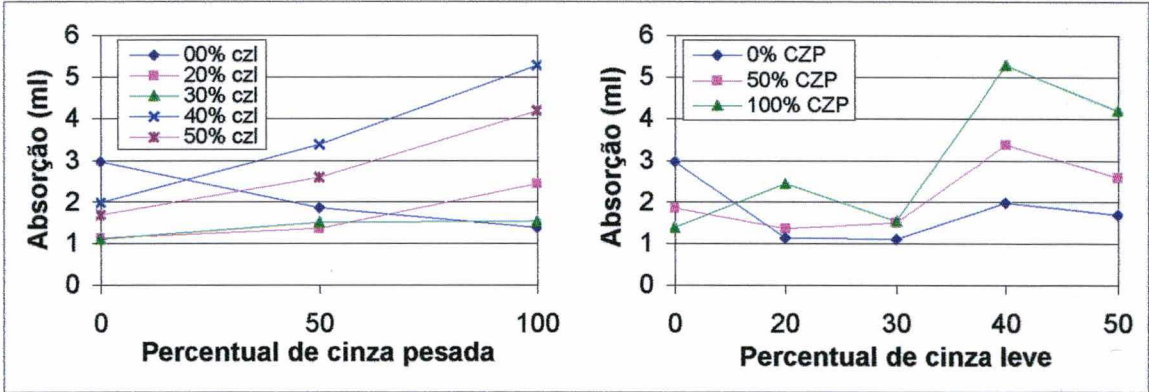


Figura 4.16 - Absorção por baixa pressão (método do cachimbo) das argamassas, em função do teor de cinzas.

No gráfico da figura 4.16, onde é mostrada a absorção *versus* o percentual de cinza leve, as correlações não foram importantes, porém há uma tendência em aumentar a absorção com o aumento do teor de cinza leve nas argamassas com teores de cinza pesada de 50 e 100%, enquanto que as argamassas sem cinza pesada tenderam a reduzir a absorção com o aumento do teor de cinza leve.

#### 4.3.5 ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de aderência à tração apresentaram elevado coeficiente de variação, a exemplo de outras pesquisas, como apresentado por Mibieli (1989). Dessa maneira, os resultados foram apresentados na tabela 4.5 em duas formas, tal qual coletados e estatisticamente tratados, isto é, eliminando-se valores espúrios até o limite de três ou até alcançar coeficiente de variação inferior a 10%.

**Tabela 4.5 - Resistência de aderência à tração com os respectivos coeficientes de variação**

| Argamassa<br>n° | Sem tratamento estatístico                             |                                   | Com tratamento estatístico                             |                                   |
|-----------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
|                 | Resistência<br>média de<br>aderência à<br>tração (Mpa) | Coeficiente<br>de variação<br>(%) | Resistência<br>média de<br>aderência à<br>tração (Mpa) | Coeficiente<br>de variação<br>(%) |
| 1               | 0,157  | 22                                | 0,152  | 6                                 |
| 2               | 0,065  | 15                                | 0,069  | 6                                 |
| 3               | 0,066  | 58                                | 0,059  | 47                                |
| 4               | 0,102  | 15                                | 0,110  | 7                                 |
| 5               | 0,110  | 34                                | 0,098  | 20                                |
| 6               | 0,147  | 47                                | 0,125  | 26                                |
| 7               | 0,066  | 37                                | 0,061  | 27                                |
| 8               | 0,197  | 16                                | 0,209  | 7                                 |
| 9               | 0,134  | 41                                | 0,148  | 22                                |
| 10              | 0,135  | 28                                | 0,122  | 18                                |
| 11              | 0,083  | 30                                | 0,075  | 14                                |
| 12              | 0,091  | 40                                | 0,077  | 14                                |
| 13              | 0,077  | 44                                | 0,071  | 33                                |
| 14              | 0,081  | 32                                | 0,074  | 24                                |
| 15              | 0,121  | 49                                | 0,105  | 47                                |



Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de aderência à tração das argamassas em estudo

| Argamassa N° | Carga de ruptura (kN) | Diâmetro de ruptura (mm) | Área da pastilha (mm <sup>2</sup> ) | Resistência de aderência à tração (MPa) | Espessura do revestimento (mm) | * Forma de ruptura | Argamassa N°       | Carga de ruptura (kN) | Diâmetro de ruptura (mm) | Área da pastilha (mm <sup>2</sup> ) | Resistência de aderência à tração (MPa) | Espessura do revestimento (mm) | * Forma de ruptura |
|--------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------|
| 1            | 0,277                 | 46,5                     | 1698                                | 0,163                                   | 20                             | B                  | 9                  | 0,224                 | 47,5                     | 1772                                | 0,126                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,219                 | 44,5                     | 1555                                | 0,141                                   | 20                             | B                  |                    | 0,377                 | 48,3                     | 1832                                | 0,206                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,213                 | 49,0                     | 1886                                | 0,113                                   | 20                             | B                  |                    | 0,257                 | 49,5                     | 1924                                | 0,134                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,283                 | 48,5                     | 1847                                | 0,153                                   | 20                             | B                  |                    | 0,200                 | 48,8                     | 1870                                | 0,107                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,271                 | 48,0                     | 1810                                | 0,150                                   | 20                             | B                  |                    | 0,277                 | 48,3                     | 1832                                | 0,151                                   | 20                             | B                  |
| 2            | 0,422                 | 49,5                     | 1924                                | 0,219                                   | 20                             | B                  |                    | 0,106                 | 48,5                     | 1847                                | 0,057                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,140                 | 48,3                     | 1832                                | 0,076                                   | 20                             | A                  |                    | 0,094                 | 49,0                     | 1886                                | 0,050                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,117                 | 47,8                     | 1795                                | 0,065                                   | 20                             | A                  |                    | 0,362                 | 49,5                     | 1924                                | 0,188                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,085                 | 48,3                     | 1832                                | 0,046                                   | 20                             | A                  |                    | 0,353                 | 49,5                     | 1924                                | 0,183                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,126                 | 48,5                     | 1847                                | 0,068                                   | 20                             | A                  | 10                 | 0,280                 | 44,0                     | 1521                                | 0,184                                   | 20                             | B                  |
| 3            | 0,130                 | 49,3                     | 1909                                | 0,068                                   | 20                             | A                  |                    | 0,162                 | 45,3                     | 1612                                | 0,101                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,121                 | 47,8                     | 1795                                | 0,067                                   | 20                             | A                  |                    | 0,157                 | 44,8                     | 1576                                | 0,100                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,053                 | 50,0                     | 1964                                | 0,027                                   | 20                             | A                  |                    | 0,218                 | 44,5                     | 1555                                | 0,140                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,149                 | 49,8                     | 1948                                | 0,076                                   | 20                             | A                  |                    | 0,295                 | 44,5                     | 1555                                | 0,190                                   | 20                             | B                  |
| 4            | 0,099                 | 50,0                     | 1964                                | 0,050                                   | 20                             | A                  |                    | 0,146                 | 44,5                     | 1555                                | 0,094                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,146                 | 49,0                     | 1886                                | 0,077                                   | 20                             | A                  | 11                 | 0,245                 | 46,3                     | 1684                                | 0,146                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,067                 | 48,8                     | 1870                                | 0,036                                   | 20                             | A                  |                    | 0,218                 | 47,5                     | 1772                                | 0,123                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,061                 | 50,0                     | 1964                                | 0,031                                   | 20                             | A                  |                    | 0,212                 | 45,5                     | 1626                                | 0,130                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,254                 | 49,0                     | 1886                                | 0,135                                   | 20                             | A                  |                    | 0,134                 | 46,0                     | 1662                                | 0,081                                   | 20                             | B                  |
| 5            | 0,199                 | 48,8                     | 1870                                | 0,106                                   | 20                             | A                  |                    | 0,127                 | 45,8                     | 1647                                | 0,077                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,034                 | 50,0                     | 1964                                | 0,017                                   | 20                             | A                  | 12                 | 0,092                 | 46,0                     | 1662                                | 0,055                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,120                 | 49,0                     | 1886                                | 0,064                                   | 20                             | A                  |                    | 0,148                 | 46,5                     | 1698                                | 0,087                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,211                 | 49,8                     | 1948                                | 0,108                                   | 20                             | A                  |                    | 0,108                 | 46,3                     | 1684                                | 0,064                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,179                 | 46,8                     | 1720                                | 0,104                                   | 20                             | A                  |                    | 0,113                 | 47,3                     | 1757                                | 0,064                                   | 20                             | B                  |
| 6            | 0,208                 | 47,3                     | 1757                                | 0,118                                   | 20                             | A                  |                    | 0,196                 | 48,3                     | 1832                                | 0,107                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,123                 | 44,5                     | 1555                                | 0,079                                   | 20                             | A                  | 13                 | 0,159                 | 48,0                     | 1810                                | 0,088                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,143                 | 44,8                     | 1576                                | 0,091                                   | 20                             | A                  |                    | 0,264                 | 48,5                     | 1847                                | 0,143                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,209                 | 48,0                     | 1810                                | 0,115                                   | 20                             | B                  |                    | 0,121                 | 47,5                     | 1772                                | 0,068                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,190                 | 48,5                     | 1847                                | 0,103                                   | 20                             | B                  |                    | 0,159                 | 48,5                     | 1847                                | 0,086                                   | 20                             | B                  |
| 7            | 0,246                 | 42,0                     | 1385                                | 0,178                                   | 20                             | A                  |                    | 0,122                 | 49,0                     | 1886                                | 0,065                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,154                 | 44,0                     | 1521                                | 0,101                                   | 20                             | A                  | 14                 | 0,091                 | 48,0                     | 1810                                | 0,050                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,118                 | 45,0                     | 1590                                | 0,074                                   | 20                             | A                  |                    | 0,275                 | 48,5                     | 1847                                | 0,149                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,163                 | 45,5                     | 1626                                | 0,100                                   | 20                             | A                  |                    | 0,140                 | 48,5                     | 1847                                | 0,076                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,141                 | 45,5                     | 1626                                | 0,087                                   | 20                             | A                  |                    | 0,078                 | 46,0                     | 1662                                | 0,047                                   | 20                             | B                  |
| 8            | 0,120                 | 48,0                     | 1810                                | 0,066                                   | 20                             | A                  |                    | 0,079                 | 46,3                     | 1684                                | 0,047                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,233                 | 48,5                     | 1847                                | 0,126                                   | 20                             | A                  | 15                 | 0,150                 | 44,3                     | 1541                                | 0,097                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,256                 | 47,3                     | 1757                                | 0,146                                   | 20                             | B                  |                    | 0,087                 | 40,5                     | 1288                                | 0,068                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,341                 | 49,0                     | 1886                                | 0,181                                   | 20                             | A                  |                    | 0,170                 | 45,5                     | 1626                                | 0,105                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,205                 | 49,5                     | 1924                                | 0,107                                   | 20                             | A                  |                    | 0,157                 | 44,5                     | 1555                                | 0,101                                   | 20                             | B                  |
| 9            | 0,146                 | 49,5                     | 1924                                | 0,076                                   | 20                             | A                  |                    | 0,105                 | 44,5                     | 1555                                | 0,068                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,201                 | 50,0                     | 1964                                | 0,102                                   | 20                             | A                  | 16                 | 0,048                 | 45,5                     | 1626                                | 0,030                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,249                 | 50,0                     | 1964                                | 0,127                                   | 20                             | A                  |                    | 0,231                 | 46,5                     | 1698                                | 0,136                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,211                 | 50,0                     | 1964                                | 0,107                                   | 20                             | A                  |                    | 0,085                 | 45,5                     | 1626                                | 0,052                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,367                 | 49,3                     | 1909                                | 0,192                                   | 20                             | A                  |                    | 0,172                 | 46,8                     | 1720                                | 0,100                                   | 20                             | A                  |
| 10           | 0,537                 | 48,8                     | 1870                                | 0,287                                   | 20                             | B                  |                    | 0,215                 | 47,0                     | 1735                                | 0,124                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,048                 | 44,8                     | 1576                                | 0,030                                   | 20                             | A                  | 17                 | 0,155                 | 47,8                     | 1795                                | 0,086                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,083                 | 45,3                     | 1612                                | 0,051                                   | 20                             | A                  |                    | 0,091                 | 44,8                     | 1576                                | 0,058                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,075                 | 44,8                     | 1576                                | 0,048                                   | 20                             | A                  |                    | 0,172                 | 46,5                     | 1698                                | 0,101                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,164                 | 45,5                     | 1626                                | 0,101                                   | 20                             | B                  |                    | 0,112                 | 47,5                     | 1772                                | 0,063                                   | 20                             | A                  |
| 11           | 0,112                 | 45,0                     | 1590                                | 0,070                                   | 20                             | A                  |                    | 0,112                 | 47,0                     | 1735                                | 0,065                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,164                 | 46,8                     | 1720                                | 0,095                                   | 20                             | A                  | 18                 | 0,123                 | 49,3                     | 1909                                | 0,064                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,153                 | 46,8                     | 1720                                | 0,089                                   | 20                             | B                  |                    | 0,162                 | 49,0                     | 1886                                | 0,086                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,085                 | 48,0                     | 1810                                | 0,047                                   | 20                             | A                  |                    | 0,113                 | 49,8                     | 1948                                | 0,058                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,105                 | 47,5                     | 1772                                | 0,059                                   | 20                             | A                  |                    | 0,321                 | 48,8                     | 1870                                | 0,172                                   | 20                             | A                  |
| 12           | 0,371                 | 46,5                     | 1698                                | 0,218                                   | 20                             | B                  |                    | 0,358                 | 48,5                     | 1847                                | 0,194                                   | 20                             | B                  |
|              | 0,392                 | 47,0                     | 1735                                | 0,226                                   | 20                             | B                  |                    | 0,358                 | 49,3                     | 1909                                | 0,188                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,362                 | 47,5                     | 1772                                | 0,204                                   | 20                             | B                  |                    | 0,118                 | 49,5                     | 1924                                | 0,061                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,311                 | 45,5                     | 1626                                | 0,191                                   | 20                             | B                  |                    | 0,277                 | 49,5                     | 1924                                | 0,144                                   | 20                             | A                  |
|              | 0,353                 | 47,0                     | 1735                                | 0,203                                   | 20                             | B                  | *FORMAS DE RUPTURA |                       |                          | A                                   | Interface argamassa substrato           |                                |                    |
| 13           | 0,235                 | 46,8                     | 1720                                | 0,137                                   | 20                             | B                  |                    |                       |                          | B                                   | Argamassa de revestimento               |                                |                    |
|              |                       |                          |                                     |   |                                |                    |                    |                       |                          | C                                   | Substrato                               |                                |                    |
|              |                       |                          |                                     |   |                                |                    |                    |                       |                          | D                                   | Interface revestimento/cola             |                                |                    |
|              |                       |                          |                                     |   |                                |                    |                    |                       |                          | E                                   | Interface cola/pastilha                 |                                |                    |

Devido à elevada variabilidade encontrada nos resultados, o desempenho das argamassas em função dos teores de cinzas não apresentou correlação linear significativa.

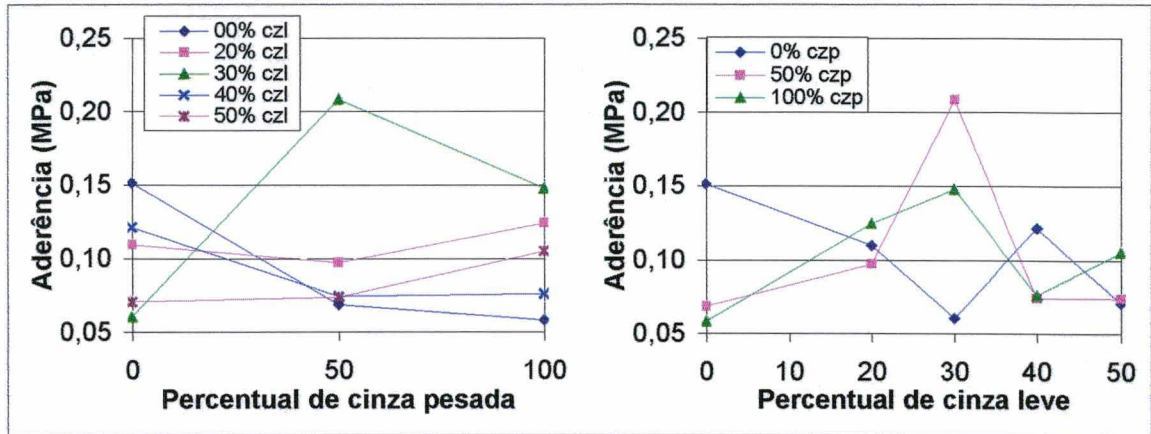


Figura 4.17 - Resistência de aderência à tração nas argamassas com variação dos teores de cinzas.

Observou-se durante os ensaios que 54% dos corpos-de-prova romperam na interface chapisco-argamassa; destes, 86% apresentaram concentração de vazios na seção rompida, conforme mostrado na tabela 4.6.

Os demais, 46%, romperam na argamassa, sendo que 46% destes apresentaram concentração de vazios na seção rompida.

Assim, 68% dos corpos-de-prova ensaiados romperam em seção estrangulada por vazios de ar aprisionado.

Considerando-se o significativo percentual (86%) de corpos-de-prova que apresentaram vazios de ar aprisionado na seção rompida na interface chapisco-argamassa, pode-se inferir que a superfície irregular do chapisco propiciou o aprisionamento do ar.

Analisando-se com mais detalhes, observou-se que a concentração desses vazios era muito variável, podendo vir daí a explicação sobre o elevado coeficiente de variação encontrado nos resultados de resistência.

Observou-se também uma tendência de aumento dos vazios de ar aprisionado na seção rompida, com o aumento dos teores de cinza pesada. As argamassas sem cinza pesada apresentaram poucos vazios de ar aprisionado na seção rompida.



#### 4.3.6 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

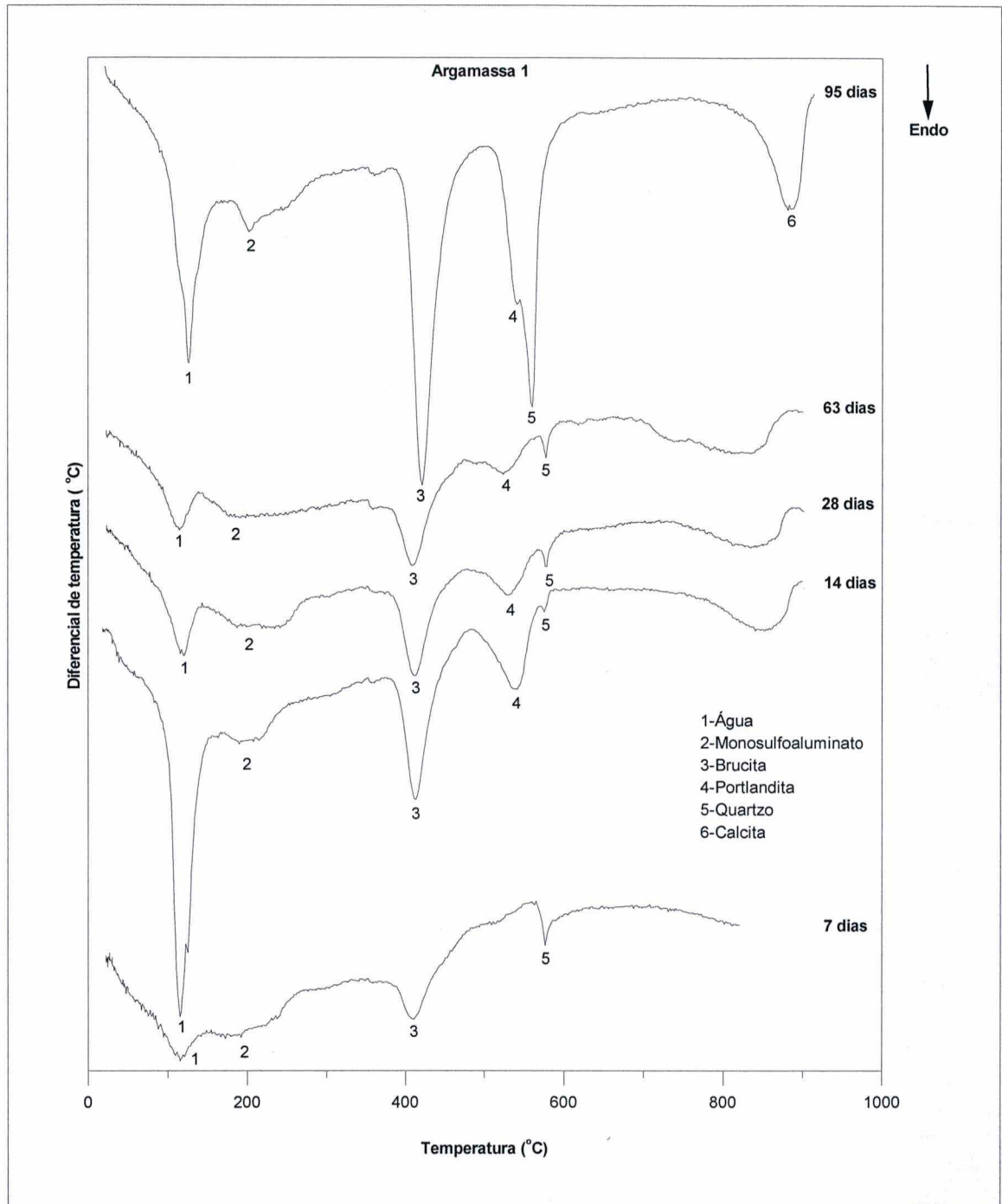
Foram ensaiadas as argamassas 1, 2 e 3, isto é, argamassa de referência, argamassa com 50% de substituição da areia por cinza pesada em volume e argamassa com substituição total da areia por cinza pesada.

Conforme os resultados apresentados nos gráficos das figuras 4.18, 4.19 e 4.20, observou-se a sobreposição dos picos da evaporação da água capilar restante e da água fisicamente adsorvida.

Os picos de água ao longo das idades apresentam intensidades variáveis. Uma das razões importantes foi a variação do tempo de secagem na preparação das amostras que não foi medido, resultando na variação do teor de água capilar restante e água fisicamente adsorvida.

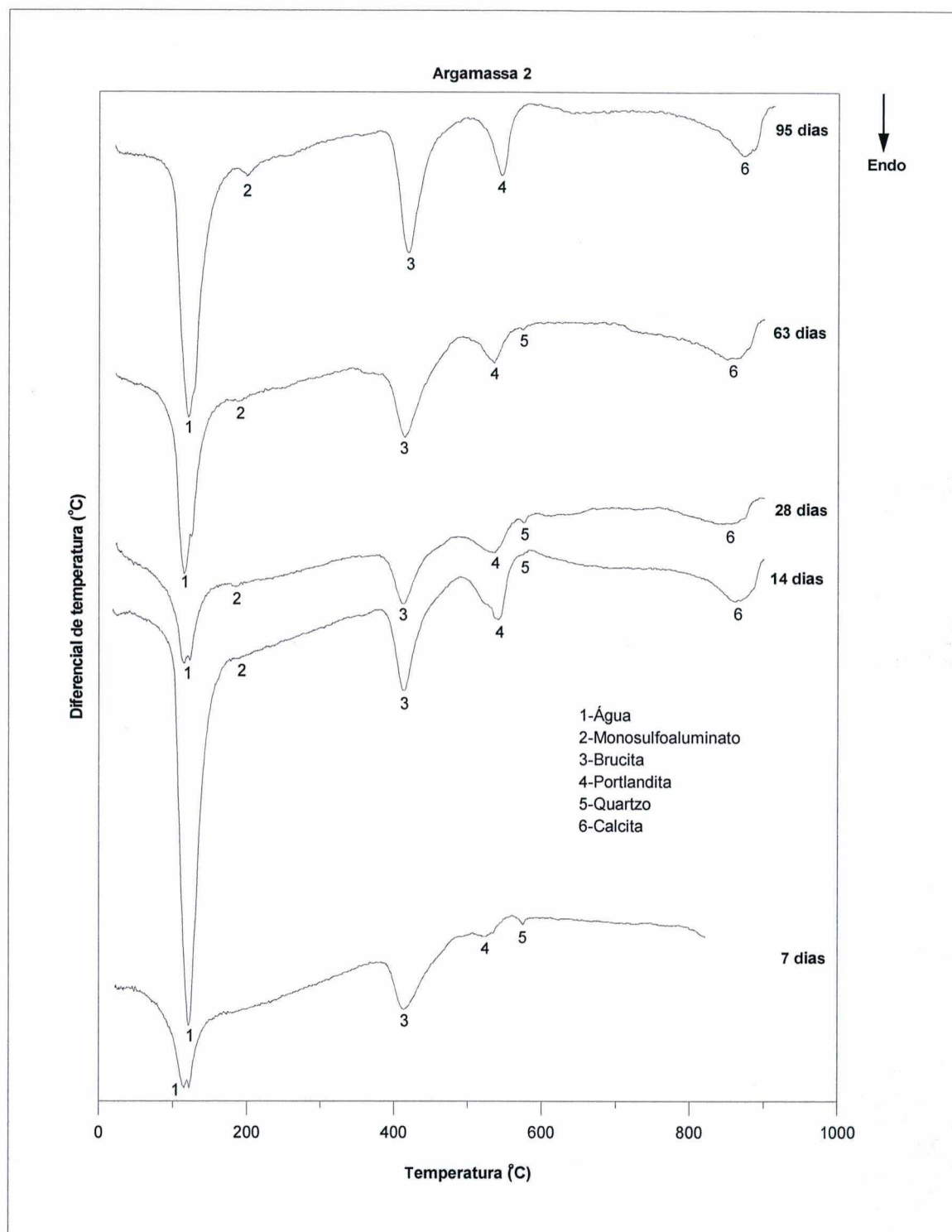
A cal utilizada neste estudo é a do tipo CH-III, possuindo um percentual significativo de óxido de magnésio (31,10%) em relação ao percentual de óxido de cálcio (41,07%).

Através dos ensaios de DRX e ATD da cal hidratada, observou-se que havia um teor elevado de magnésia (MgO) antes da maturação, sendo que, após essa *re-hidratação*, parte desse composto transformou-se em brucita  $[Mg(OH)_2]$ , permanecendo ainda uma quantidade importante sem reagir. Isto pode ser observado nos gráficos das figuras A-3 e A-4 no capítulo Anexos.



**Figura 4.18 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 1, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.**

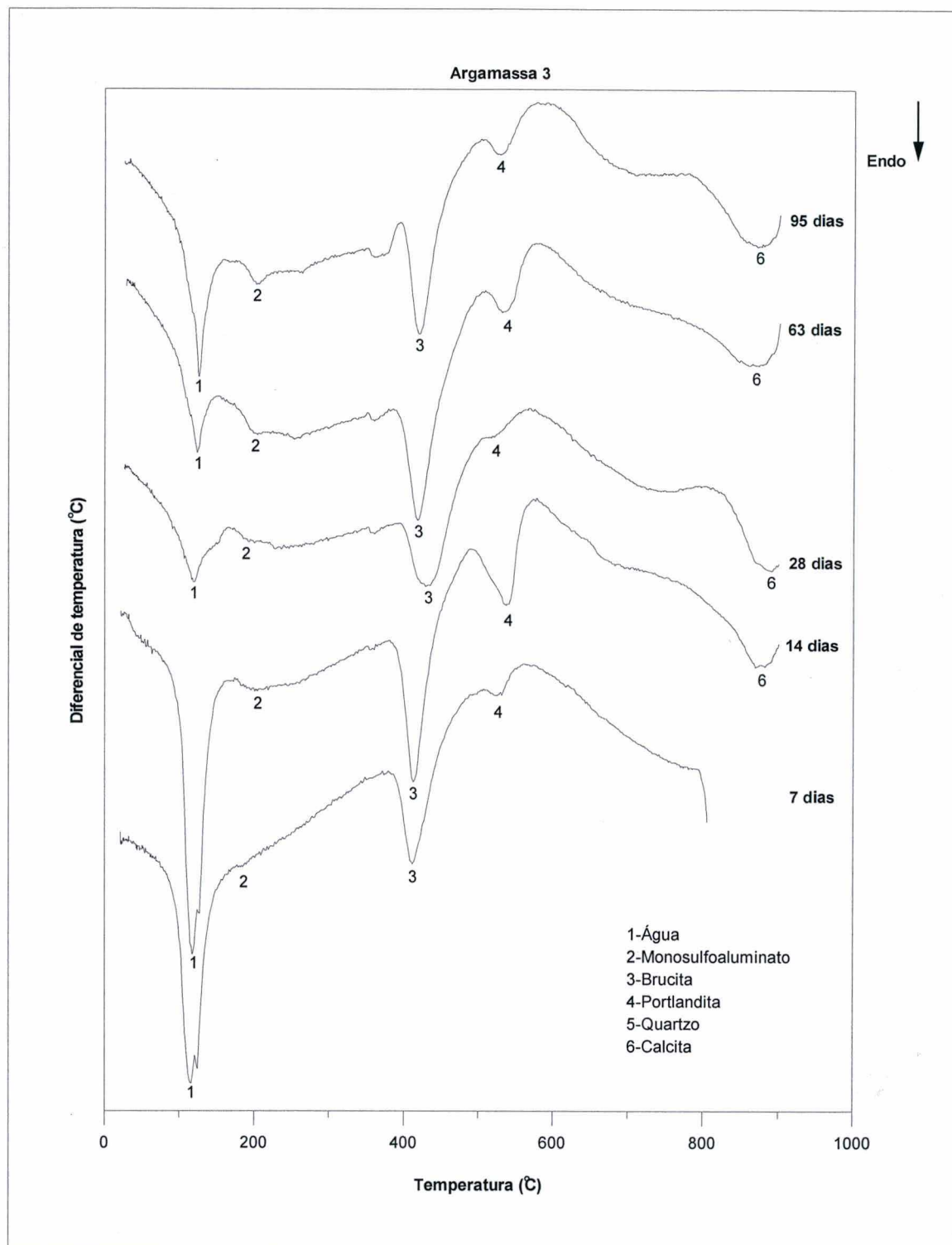
A brucita apresentou-se com baixos teores nas três argamassas na idade de 7 dias e foram proporcionais aos teores de cinza pesada; a argamassa 1, de referência, apresentou os teores de brucita praticamente constantes até a idade de 63 dias quando cresceu até o 95º dia apresentando o dobro dos teores anteriores.



**Figura 4.19 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 2, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.**

A argamassa 2 (50% de cinza pesada) apresentou crescimento acelerado dos teores de brucita até o 63<sup>o</sup> dia quando então reduziu estes teores.





**Figura 4.20 - Análise térmica diferencial (ATD) da argamassa 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.**

A argamassa 3 (100% de cinza pesada) manteve praticamente constante os teores de brucita.

Lea (1970) afirma que a brucita possui reação lenta em relação à portlandita, explicando assim esse aumento progressivo verificado na argamassa de referência a partir do 63º dia, que pode ser observado no gráfico da figura 4.21.

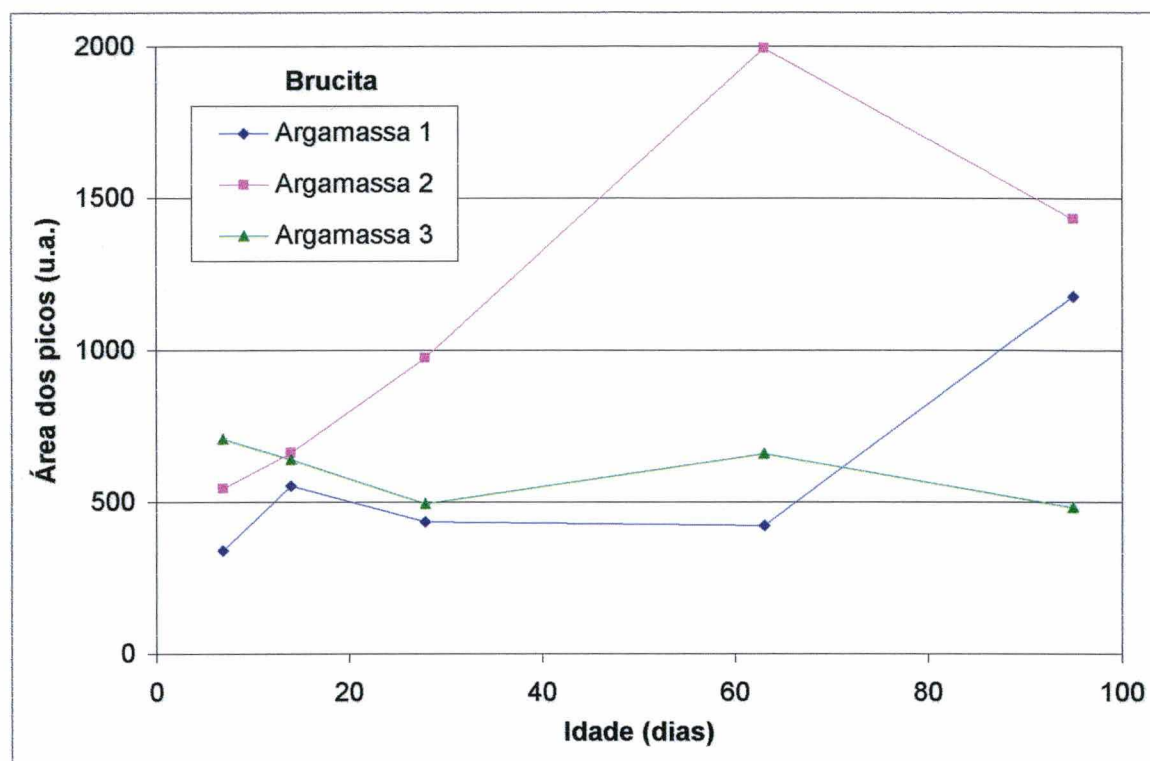


Figura 4.21 – Área do pico (ATD) da transformação da brucita nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

Ao analisar-se os teores de brucita da argamassa 2, não encontrou-se explicação para o crescimento acelerado até o 63º dia e posterior redução, principalmente porque na argamassa 3, também com cinza pesada, a formação de brucita foi diferente; este comportamento deverá ser melhor estudado através de ensaios complementares.

Quanto aos teores de portlandita, as três argamassas apresentaram crescimento até o 14º dia com teores aproximadamente iguais; na argamassa de referência a partir do 14º dia, os teores de portlandita reduziram até o 63º dia, quando aumentou significativamente até o 95º dia; para esta redução dos teores de portlandita na argamassa de referência, não encontrou-se explicações.

Seguindo a tendência apresentada na formação de brucita, na argamassa 2 (50% de cinza pesada) os teores de portlandita foram crescentes em todas as idades, como pode

ser observado na figura 4.22; fenômeno que deverá ser melhor estudado para permitir explicação.

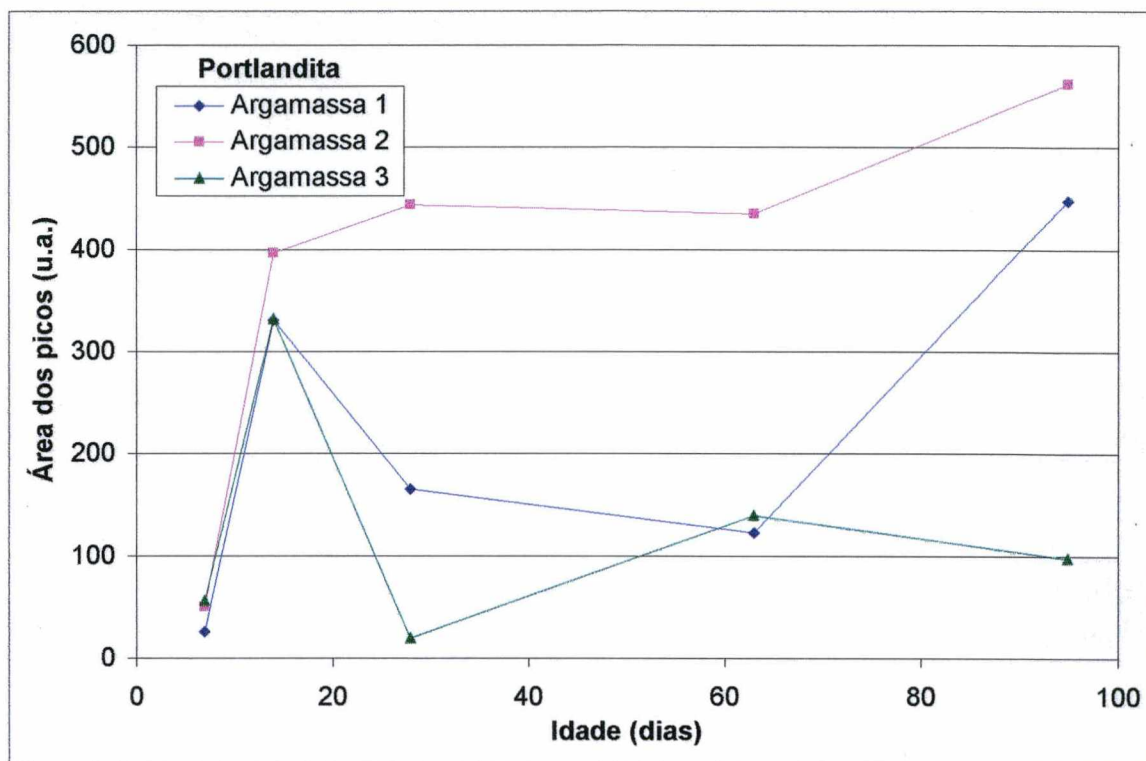


Figura 4.22 - Área do pico (ATD) da transformação da portlandita nas argamassas 1, 2 e 3 nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

A argamassa 3, com 100% de cinza pesada, apresentou teores de hidróxido de cálcio abaixo dos teores da argamassa de referência nas idades de 28 e 95 dias; nas idades iniciais e aos 63 dias os teores foram similares aos teores da argamassa de referência. Este comportamento pode ter origem no efeito retardador que a cinza pesada causa nas reações de hidratação do cimento e conseqüente desaceleração na formação de hidróxido de cálcio e num segundo momento (idades superiores a 63 dias) nas reações pozolânicas, por consumirem o hidróxido de cálcio resultante das reações de hidratação do cimento.

Essa variação da intensidade de hidróxido de cálcio em relação à argamassa de referência não refletiu no desempenho de resistência à compressão, embora a partir do 10º dia a argamassa com 100% de cinza pesada já apresentava resistência superior à da argamassa de referência. Logo após ao 63º dia, comparando as argamassas 1 e 3, a

portlandita passou a ter maior concentração na argamassa de referência (1), chegando aos 95 dias com 4,5 vezes mais portlandita que a argamassa 3.

A argamassa 2 apresentou comportamento imprevisto, pois possui os dois materiais que isoladamente a argamassa 1 (areia) e argamassa 3 (cinza pesada) possuem. Assim, uma possível explicação para este fenômeno pode ter origem a partir de uma interação entre a areia e a cinza pesada, seja ela química ou física.

Disso se pode inferir que a partir do 63<sup>o</sup> dia houve uma possível ação pozolânica da cinza pesada, diminuindo a concentração da portlandita na argamassa 3 e reduzindo a taxa de crescimento da concentração na argamassa 2, transformando-a em silicatos e/ou aluminossilicatos de cálcio hidratados, responsáveis pelo aumento da resistência à compressão, como pode ser observado nos gráficos da figura 4.7, página 80.

O quartzo que apresenta uma mudança de fase ( $\alpha$  para  $\beta$ ) a 573°C foi encontrado nas argamassas 1 e 2. Essa forma de sílica não está presente na argamassa 3.

Assim, pode-se afirmar que a presença dessa fase de SiO<sub>2</sub> é proveniente da areia utilizada como agregado nas argamassas 1 e 2, assim a sílica existente na cinza pesada não possui essa estrutura cristalina hexagonal.

Avaliando o comportamento do quartzo mostrado no gráfico da figura 4.23, desde o 7<sup>o</sup> dia até o 63<sup>o</sup> dia os teores de quartzo foram proporcionais aos teores de areia das três argamassas estudadas, porém, aos 95 dias o teor de quartzo da argamassa de referência apresentou-se 20 vezes superior ao teor observado aos 63 dias.

Para este fato não encontrou-se explicação, já que o quartzo em temperaturas normais é uma substância quimicamente inerte (Lea, 1970).



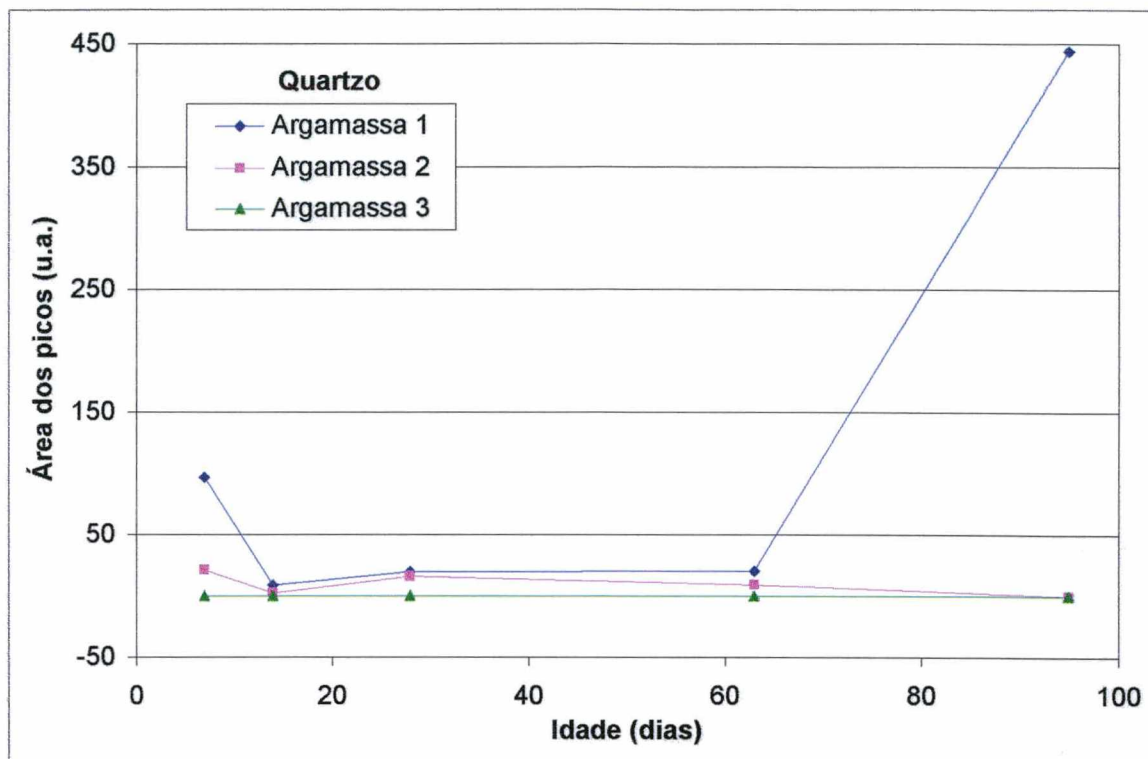


Figura 4.23 – Área do pico (ATD) da transformação do quartzo nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

A calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) libera  $\text{CO}_2$  na temperatura de  $894^\circ\text{C}$  à pressão atmosférica.

A reação que produz o carbonato de cálcio é chamada de carbonatação e ocorre entre o óxido de cálcio da argamassa e o dióxido de carbono da atmosfera.

Neste ensaio, durante o período de cura, as amostras permaneceram envolvidas por um filme de polietileno e foi escolhida uma porção do interior da amostra, de modo que a intensidade de carbonato de cálcio refletiu uma intensidade menor do que ensaios em que as amostras tenham sido curadas ao ar.

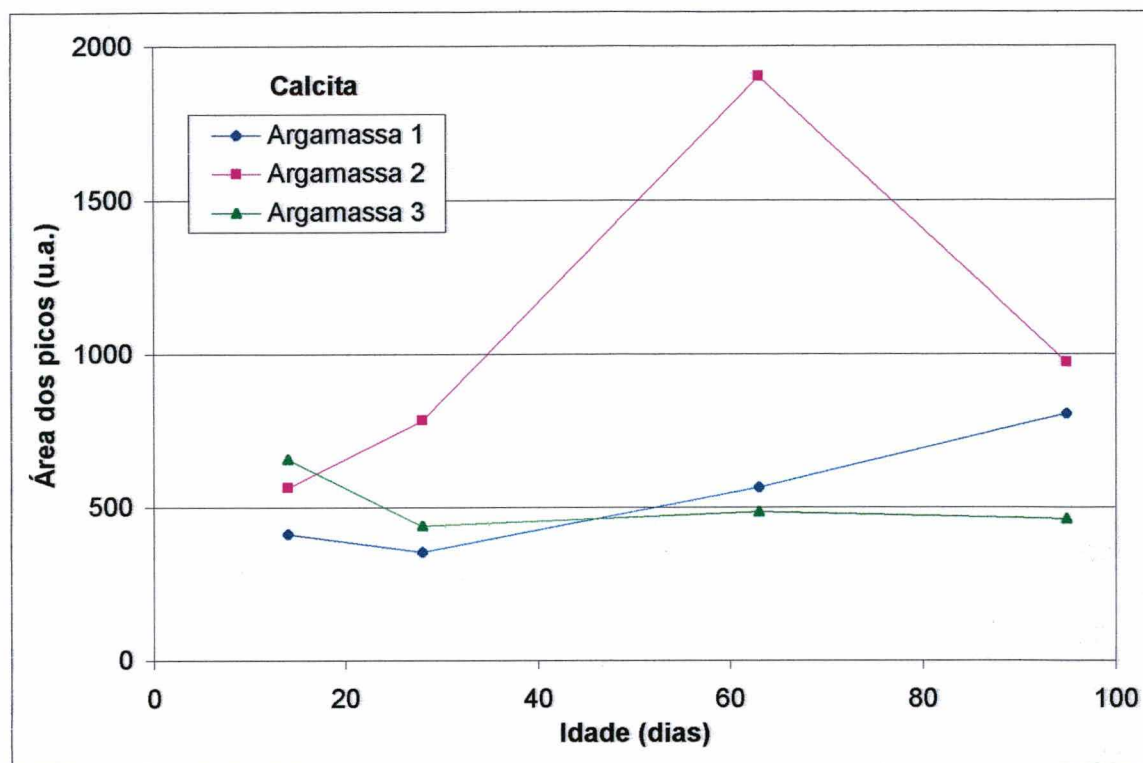


Figura 4.24 – Área de do pico (ATD) da transformação da calcita nas argamassas 1, 2 e 3, nas idades de 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

Os resultados deste ensaio mostraram na figura 4.24 que os teores de calcita da argamassa de referência e da argamassa 3 (100% de cinza pesada) são similares, isto é, entre o 14º dia e o 28º dia os teores de calcita diminuíram, elevando-se entre o 28º dia e o 63º dia.

A argamassa 2, apresentou teores crescentes até o 63º dia, reduzindo significativamente até o 95º dia, porém situando-se em patamar superior às outras argamassas estudadas.

Pode-se observar que as duas argamassas contendo cinza pesada (2 e 3) reduziram os teores de calcita entre os dias 63 e 95, ao contrário observado na argamassa de referência (sem cinza pesada).

Para isto, uma explicação possível é a de que a cinza pesada inibe ou retarda a formação da calcita. Ou ainda, que devido à maior quantidade de água existente nas argamassas com maior teor de cinza pesada, essa água, por não ter sido totalmente evaporada, bloqueia os poros, impedindo o acesso do  $\text{CO}_2$  do ar para o interior da argamassa.

A formação da calcita na estrutura da argamassa é positiva sob dois aspectos: o aumento da resistência mecânica e, principalmente, a redução da capilaridade pelo bloqueio dos

poros capilares, à medida que a carbonatação progride, reduzindo assim a absorção de água.

Devido às condições adotadas para este ensaio (minimização do contato com o CO<sub>2</sub> do ar), a efetiva carbonatação das argamassas no tempo não pôde ser avaliada. Contudo, a conclusão citada anteriormente indica que a cinza pesada pode reduzir ou retardar a carbonatação. Para se concluir positivamente sobre a carbonatação das argamassas, é necessário que novos estudos sejam realizados nesse sentido.

#### **4.3.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X**

Os resultados dos ensaios de difração de raios X nas argamassas 1, 2 e 3 são mostrados nos gráficos das figuras 4.25, 4.26 e 4.27.

Buscou-se identificar brucita, portlandita, calcita e quartzo nestes ensaios, ao longo das idades de cura das argamassas.

A brucita é formada pela hidratação do óxido de magnésio. Essa reação é mais lenta que a hidratação do óxido de cálcio e poderá levar anos (Lea, 1970).

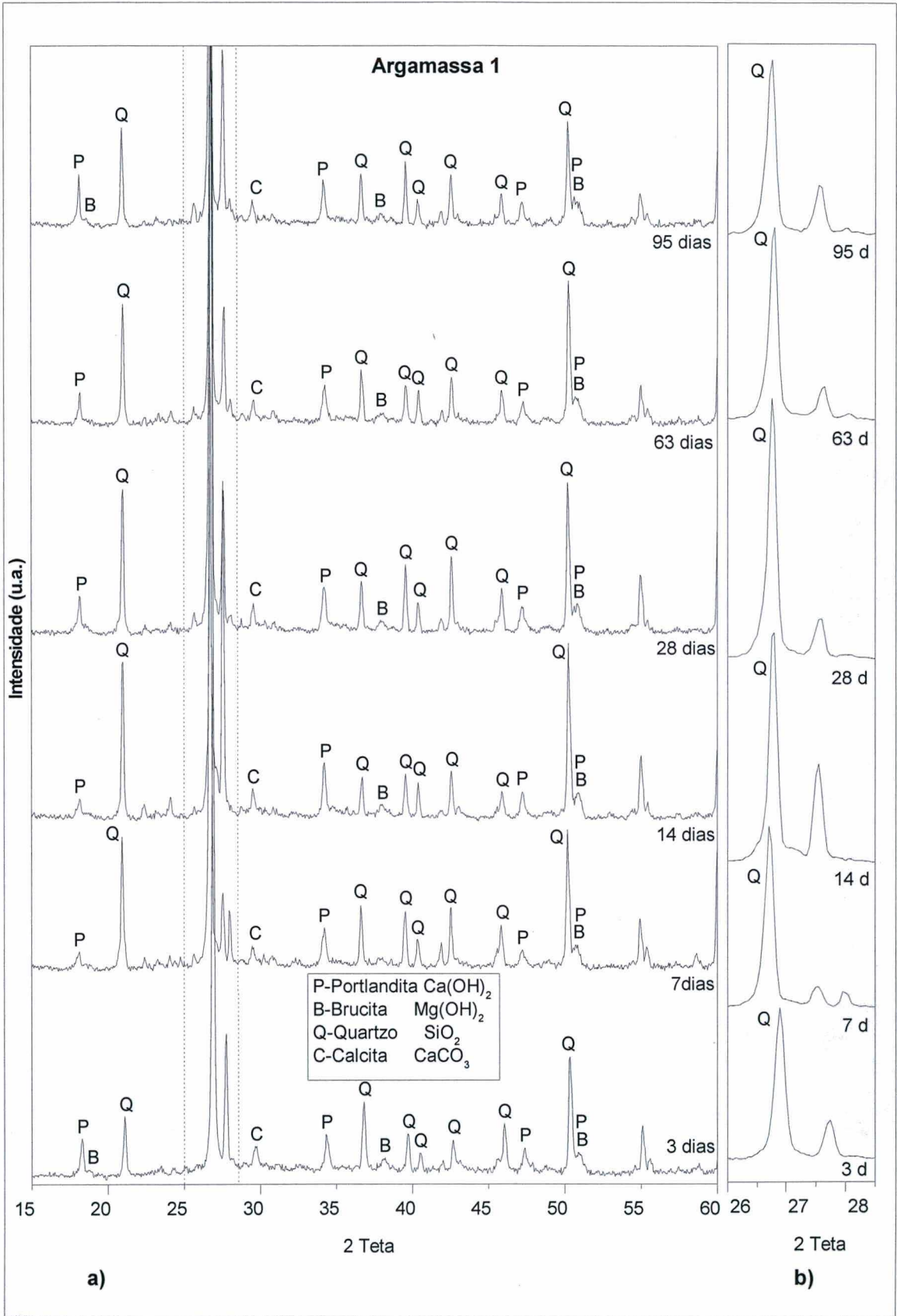


Figura 4.25 - Difratoograma de raios X da argamassa 1, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias. a) espectro total [ $15^\circ < 2\theta < 60^\circ$ ]; b) espectro parcial reduzido [ $26^\circ < 2\theta < 28,5^\circ$ ].



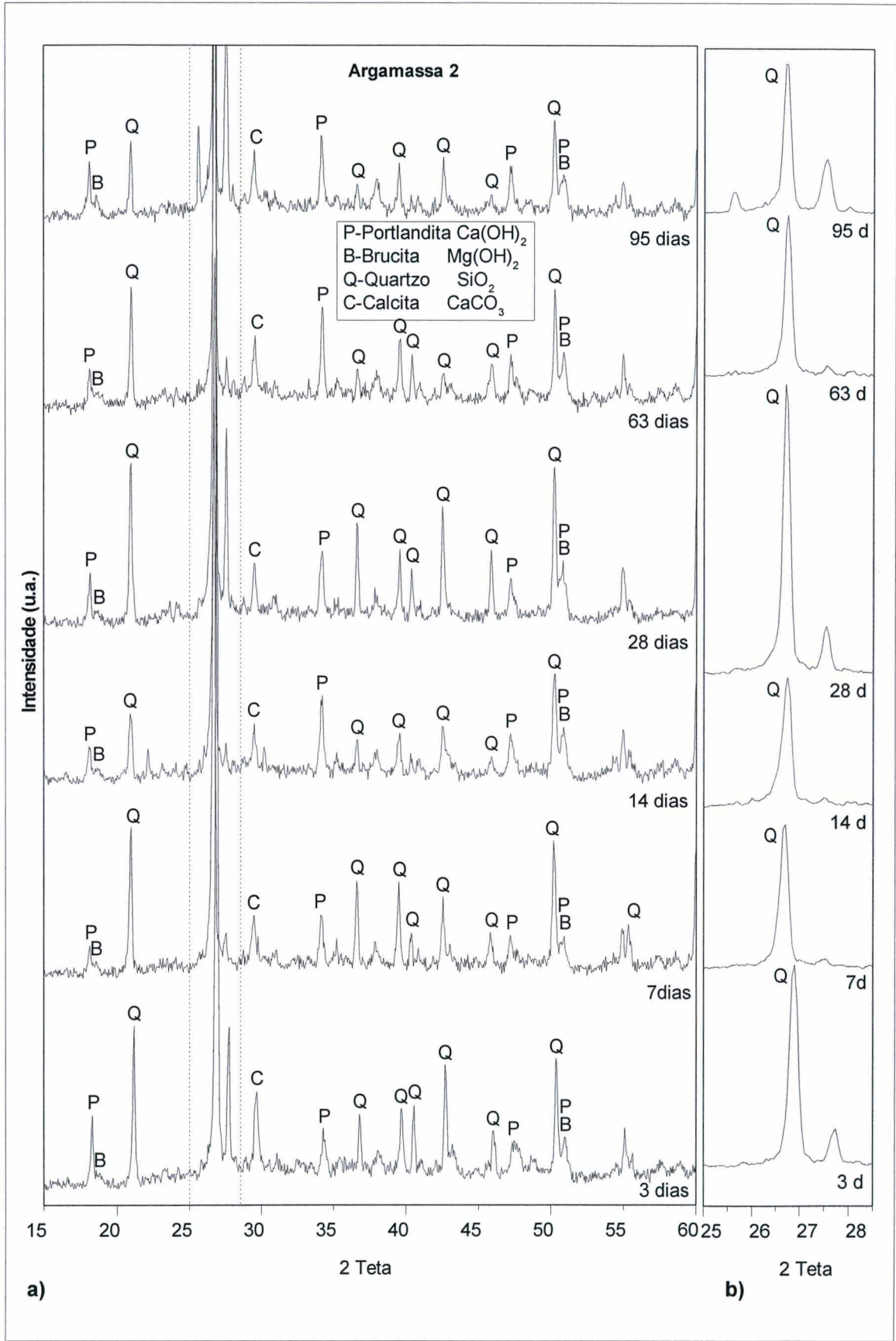


Figura 4.26 - Difratoograma de raios X da argamassa 2, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

O ensaio de ATD com a argamassa 3 (100% de cinza pesada) mostrou que há uma tendência de redução de formação de brucita entre o 63º e o 95º dia; essa tendência

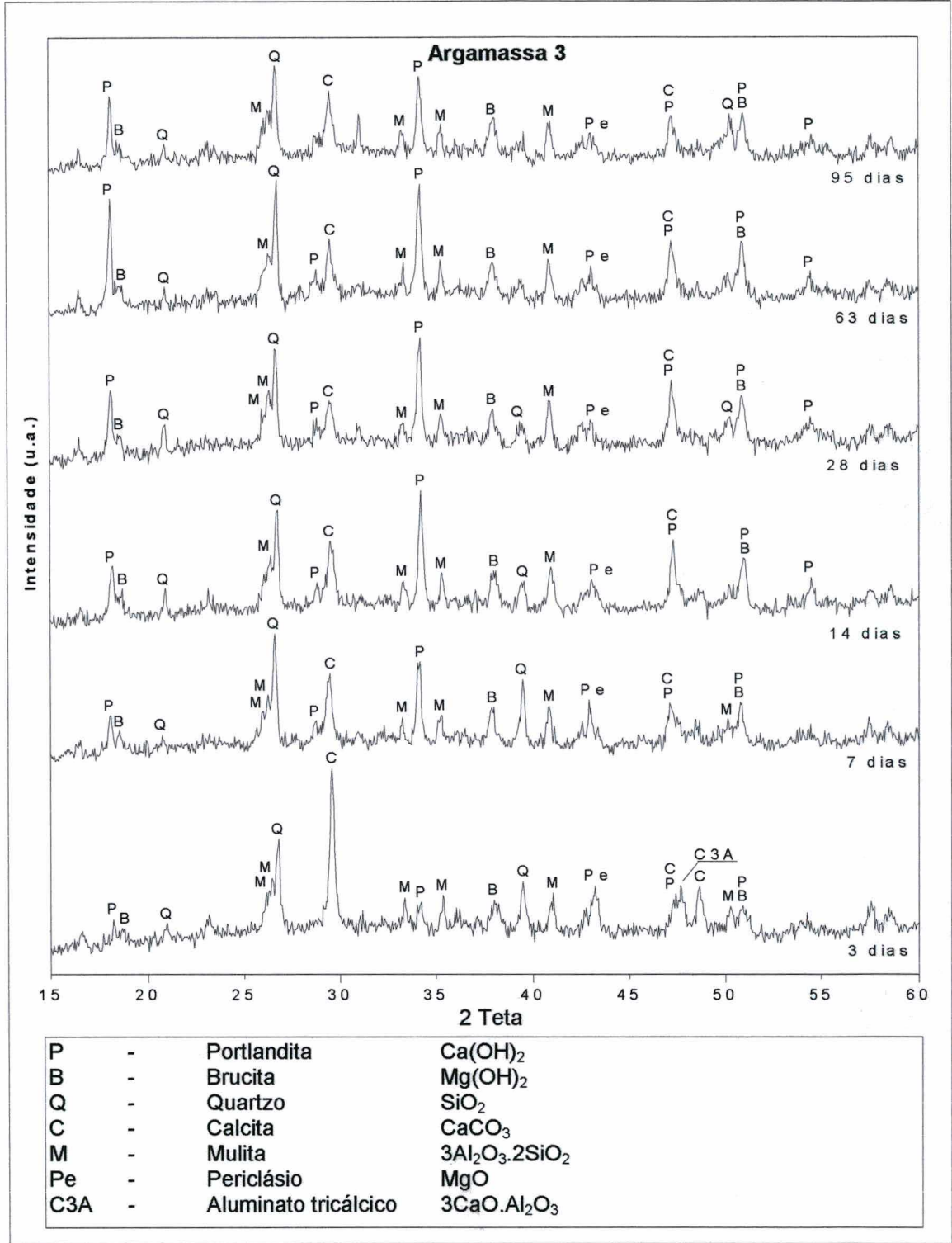


Figura 4.27 - Difratoograma de raios X da argamassa 3, nas idades de 3, 7, 14, 28, 63 e 95 dias.

também foi observada no ensaio de DRX no qual a intensidade manteve-se igual entre as idades de 63 e 95 dias, enquanto que nas argamassas 1 e 2 essa intensidade aumentou.

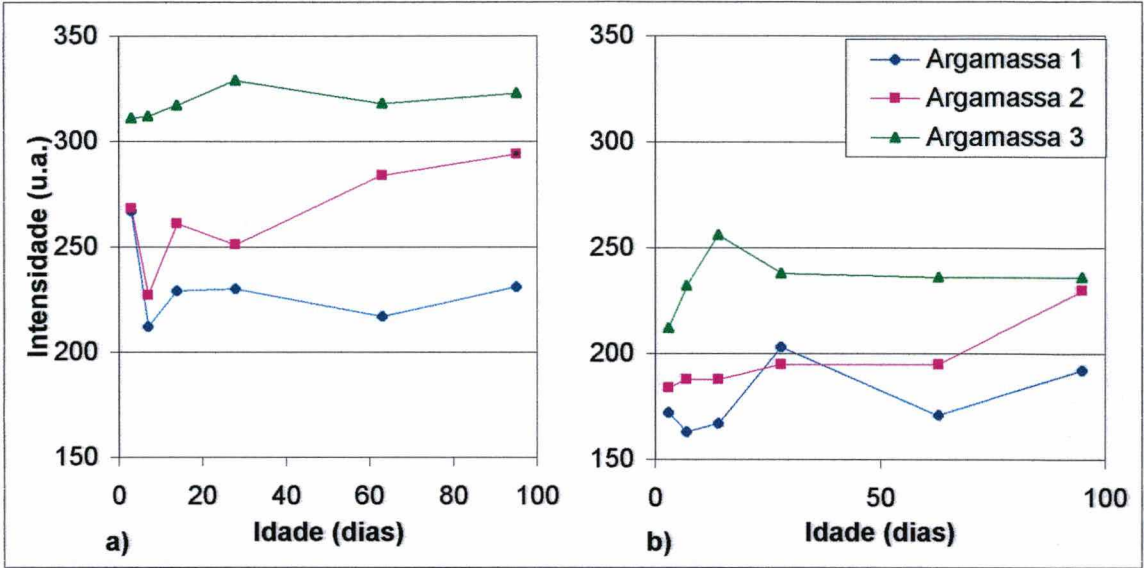


Figura 4.28 - Picos da brucita no ensaio de DRX para a)  $d_{10}=2,365\text{\AA}$  e b)  $d_8=4,77\text{\AA}$ .

Aos 3 dias, a intensidade de portlandita era tanto menor quanto maior o teor de cinza pesada da argamassa; em todas as argamassas a intensidade de portlandita aumentou até o 14º dia, reduziu no 28º dia, voltando a aumentar no 63º dia somente nas argamassas 2 e 3. A argamassa de referência reduziu a intensidade de hidróxido de cálcio aos 63 dias, e aos 95 dias teve um novo incremento, ao contrário das argamassas 2 e 3 que

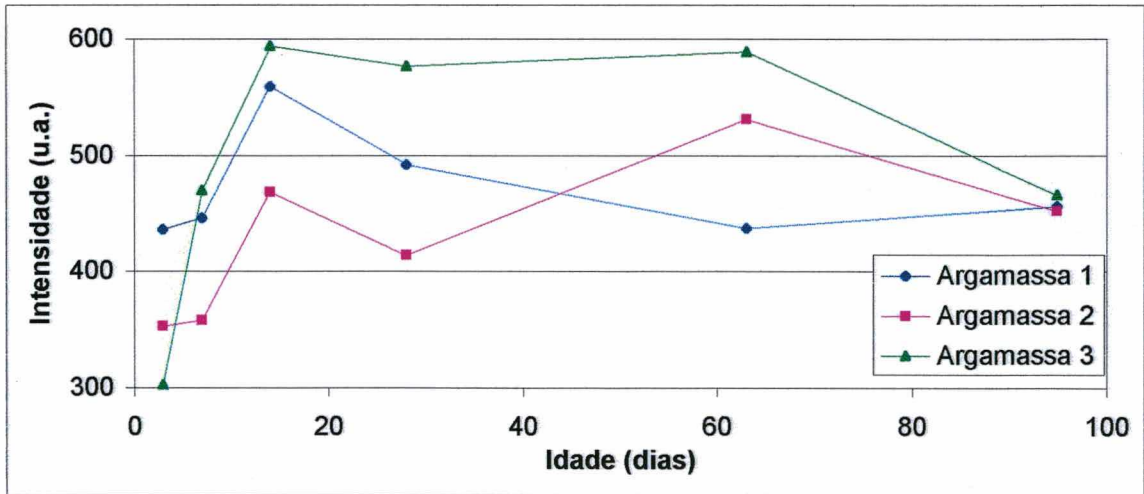


Figura 4.29 - Picos da portlandita no ensaio de DRX, para  $d_{10}=2,628\text{\AA}$  ( $hkl$  101).

reduziram muito a intensidade aos 95 dias, conforme pode ser observado na figura 4.29.

Não se encontrou explicação para a redução da intensidade de portlandita na argamassa de referência entre as idades de 14 e 63 dias.

Aos 95 dias, considerando-se o *background* superior na argamassa 3, a intensidade de portlandita é menor quanto maior o teor de cinza pesada, embora a diferença não seja significativa. A tendência apresentada pelas argamassas 2 e 3 (com cinza pesada) em reduzir a intensidade de hidróxido de cálcio é importante, significando que essas argamassas possuem um potencial maior na evolução da resistência.

O quartzo corresponde ao  $\text{SiO}_2$  ou sílica, que compõe com outros elementos uma série de silicatos, como silicato de cálcio e silicato de cálcio e alumínio; é o principal componente das pozolanas e areias.

Pela intensidade observada neste ensaio, ficou claro que o quartzo proveniente da areia possui estrutura cristalina bem definida; já a sílica da cinza pesada tem estrutura amorfa ou com fraca cristalinidade, o que a torna mais reativa.

Analisou-se a principal intensidade do quartzo, na figura 4.30, que se dá no plano 101 (*hkl* de Miller) em que a distância interplanar (*d*) é igual a 3,3325 Å.

Na argamassa de referência, a intensidade máxima do quartzo se dá aos 28 dias com 68% superior à intensidade verificada aos 3 dias; essa intensidade vai se reduzindo gradualmente até o 95º dia, quando possui intensidade 15% superior àquela dos 3 dias.

Para as oscilações das intensidades de quartzo no tempo, não encontrou-se explicação, uma vez que estas intensidades (argamassa 1 e 2) estão associadas aos teores de areia das argamassas, que são tidas como inertes.



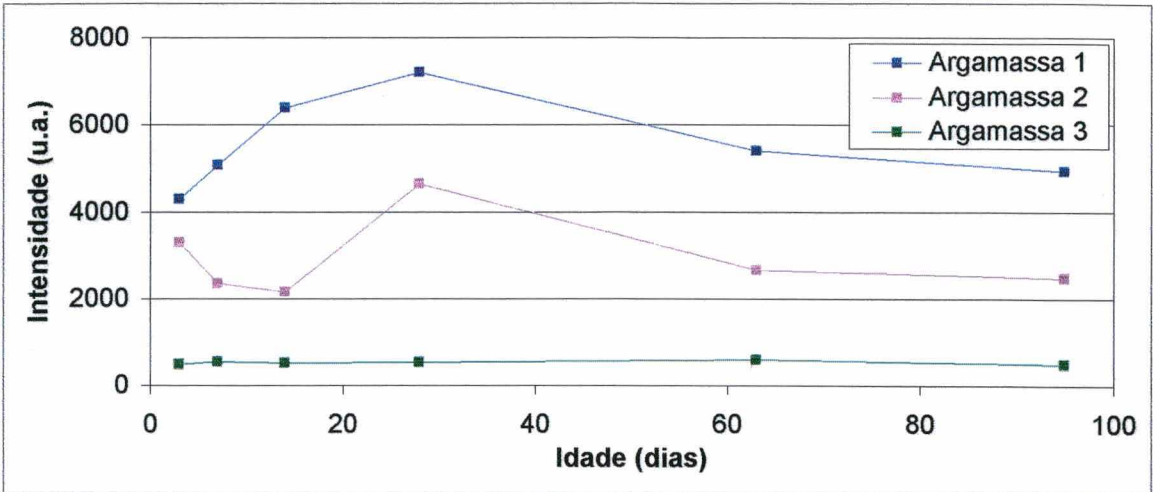


Figura 4.30 - Picos do quartzo no ensaio de DRX, para  $d_{10}=3,3325\text{\AA}$  ( $hkl$  101), nas argamassas 1, 2 e 3.

Na figura 4.31, observa-se que a evolução das intensidades de sílica e portlandita apresentam a mesma tendência de redução no tempo, o que pode ser explicado pela ligação física entre a cal e a sílica citada por Lea (1970).

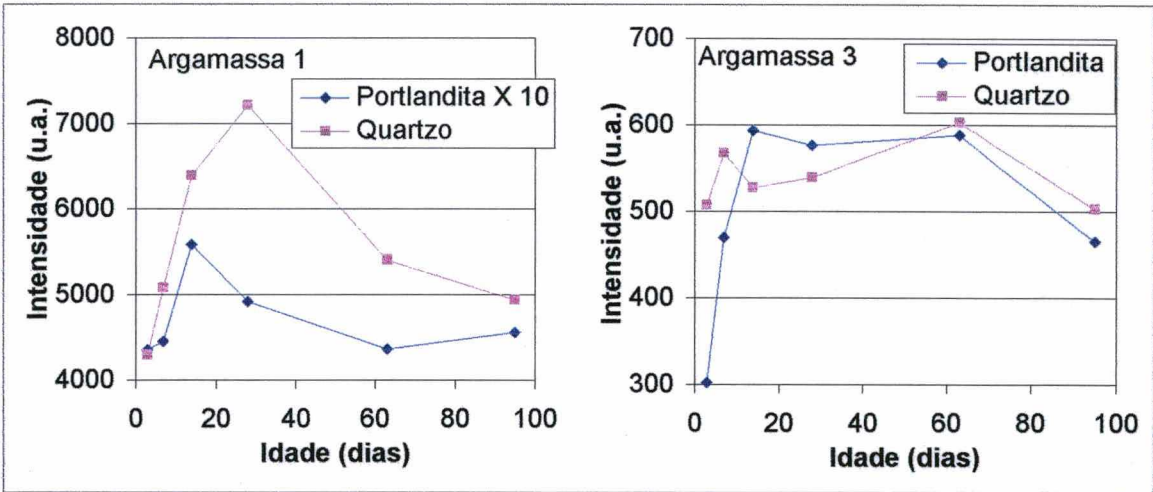


Figura 4.31 - Comparação entre os picos de DRX entre a portlandita e quartzo das argamassas 1 e 3.

A argamassa 2 diferenciou-se da de referência não só pela menor intensidade das difrações, mas também porque entre o 10º e o 14º dia apresentou uma sensível redução da intensidade, voltando a crescer aos 28 dias, quanto então foi reduzindo gradualmente, com a mesma tendência verificada na argamassa de referência.

A intensidade de calcita nas três argamassas apresentou a mesma tendência ao longo das idades estudadas, com exceção ao 28º dia, quando essas argamassas mostraram aproximadamente a mesma intensidade, conforme gráfico da figura 4.32.

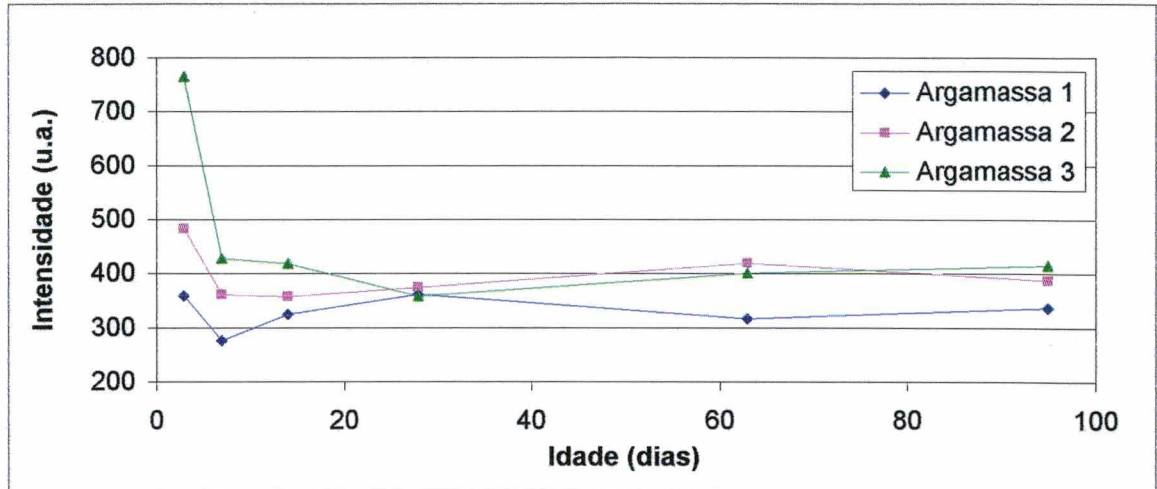


Figura 4.32 - Picos de calcita no ensaio DRX para  $d_{10}=3,028 \text{ \AA}$ , nas argamassas 1, 2 e 3.

Devido ao comportamento contraditório entre os resultados da calcita nos ensaios de ATD e DRX, e ao aspecto de que o ensaio de ATD foi interrompido aos  $900^{\circ}\text{C}$ , isto é, bem no limite superior da transformação do  $\text{CaCO}_3$ , o que certamente interferiu na medida do pico da calcita, tornou-se impossível encontrar explicação lógica para o comportamento deste composto, no intervalo de tempo estudado.

Conforme já mencionado na seção anterior (ATD), a calcita deverá ser melhor estudada, para identificar sua influência na capilaridade das argamassas, considerando o tempo, a velocidade de reação, a penetração e o modo como a carbonatação se comporta em presença de cinza pesada nas argamassas.

#### 4.4 DISCUSSÃO

Após a análise dos resultados dos ensaios descritos acima, cabe agora discutir esses resultados em um contexto amplo, envolvendo a influência de cada um dos materiais utilizados na fabricação dessas argamassas.

Os efeitos das substituições de cimento por cinza leve não alteraram a demanda de água nas argamassas; já as substituições de areia por cinza pesada promoveram aumento da

demanda de água em cerca de 8% nas argamassas com 50% de cinza pesada para todos os teores de cinza leve, e quando se substitui 100% de areia o aumento da demanda fica próximo a 12%. Logo, em todas as argamassas o teor de cinza pesada está associado a um pequeno aumento do teor de água.

Isto pode ser observado quando se comparam as relações de água, em volume. A melhor comparação da demanda de água é aquela que envolve todos os materiais secos, devido às significativas diferenças na massa específica desses materiais; assim, tem-se a relação água/materiais secos como parâmetro de referência.

Outro aspecto importante é relacionar os materiais em volume, pois o traço-base foi definido em volume; dessa forma, o volume dos materiais envolvidos em todas as argamassas estudadas são constantes, evidenciando com precisão a demanda de água.

A água exerce fundamental papel no desempenho das argamassas. Assim sendo, as argamassas necessitam de uma característica de manter a água no compósito para que as reações de hidratação não sejam prejudicadas, e especialmente para que não haja retração por secagem que resulte na fissuração prejudicial da argamassa.

Essa propriedade é a retenção de água, que nessas argamassas foi mensurada, constatando-se pequena redução da retenção de água em relação à argamassa de referência. Porém, apesar dessa redução as argamassas apresentaram índice superior ao mínimo fixado pelas normas internacionais.

Outra propriedade que avalia a água das argamassas quanto ao seu equilíbrio com os demais materiais, caracterizando a segregação, é a exsudação. O aumento dos teores de cinzas nas argamassas promoveu pequeno aumento da exsudação. Porém, observou-se um fato curioso: quando as cinzas são usadas separadamente, reduzem a exsudação nos intervalos estudados.

De todas as argamassas estudadas, somente a **argamassa 9** (30% CZL e 100% CZP) apresentou exsudação superior à argamassa de referência.

Assim como a água, o teor de ar incorporado influencia a trabalhabilidade das argamassas. Observou-se que nas substituições de cimento por cinza leve houve redução do teor de ar incorporado, e que nas substituições de areia por cinza pesada o teor de ar



incorporado teve comportamento diverso, isto é, nas substituições de 50% de areia, houve acréscimo de 8,5%. Já na substituição total de areia, houve aumento de 615%, sendo o teor médio de ar incorporado para argamassas com 100% de cinza pesada igual a 2,2%.

Aqui há dois aspectos a serem discutidos: o primeiro é o aumento elevado do teor de ar quando se passa a usar somente cinza pesada como agregado (615% em relação à referência), conforme já comentado no item 4.2.2, e também que a massa específica reduzida dessas argamassas sem areia pode ter influenciado esse crescimento; e o segundo é que, neste ensaio, as argamassas foram adensadas com soquete reduzindo o ar incorporado, explicando os níveis baixos alcançados (Teor de ar incorporado máximo igual a 2,2%).

O teor de ar incorporado assim como o teor de água das argamassas influenciam o índice de vazios das argamassas. O que se verificou foi a complementação dos efeitos de ar incorporado e do teor de água sobre o índice de vazios das argamassas endurecidas, melhor entendido quando se analisa o gráfico da figura 4.11, na página 85.

Dessa forma, o efeito do índice de vazios das argamassas foi refletido nos ensaios de massa específica, conforme pode ser observado no gráfico da figura 4.32, onde a CZP reduziu essa massa específicas em até 25%, em média, e as argamassas com CZL tiveram variações insignificantes para mais e para menos.

Já nas argamassas com CZP e CZL houve redução ainda maior da massa específica. Esse efeito do uso de ambas as cinzas na massa específica pode ser explicado pelo fechamento dos poros das partículas da cinza pesada pela cinza leve, impedindo o acesso do gel para o interior das partículas porosas de cinza pesada, limitando seu preenchimento.



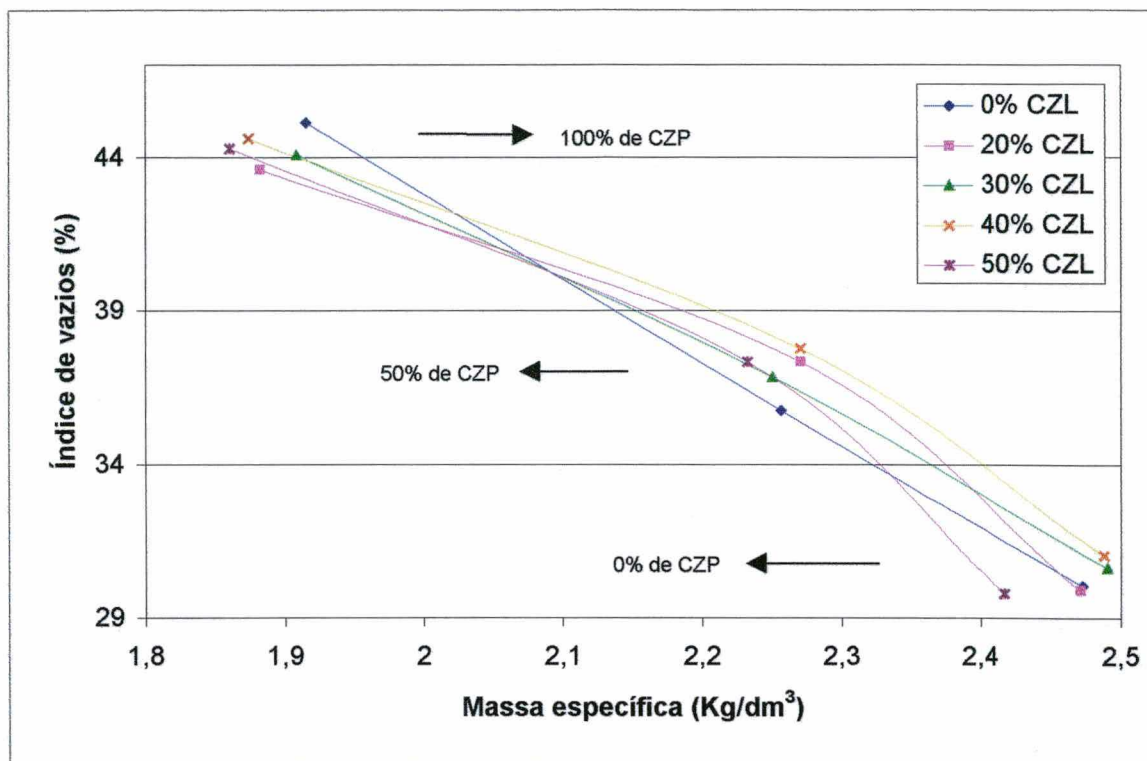


Figura 4.33 - Comparação entre a massa específica real e o índice de vazios das argamassas.

Comparando-se as massas específicas dessas argamassas com as respectivas resistências à compressão aos 90 dias, pode-se observar na figura 4.34 que a resistência à compressão é inversamente proporcional à massa específica.

A cinza pesada influenciou significativamente o aumento da resistência à compressão, alcançando o dobro da resistência da argamassa de referência a partir do 60º dia para todos os teores de cinza leve. O período de maior desenvolvimento de resistência deu-se entre 28 e 60 dias para os teores de substituição estudados.

A substituição do cimento pela cinza leve promove a redução da resistência, porém em proporção menor que o teor de substituição, caracterizando um efeito pozolânico da cinza leve.

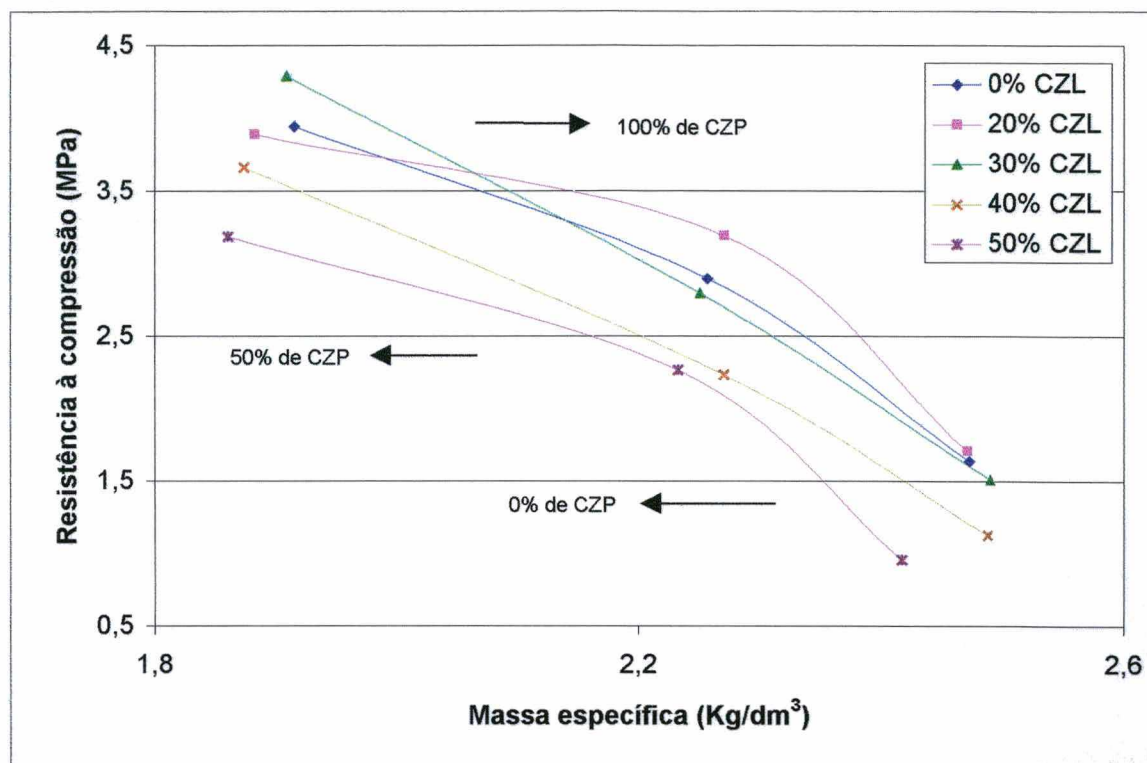


Figura 4.34 - Resistência à compressão aos 90 dias, em função da massa específica das argamassas.

Ainda no aspecto resistência mecânica, a aderência à tração apresentou elevada variabilidade nos resultados, por isso não foi possível avaliar a influência da variação dos teores de substituição das cinzas nessas argamassas. Uma explicação possível foi a redução da seção de ruptura dos corpos-de-prova, devido ao aprisionamento de ar no interior das argamassas quando projetadas nas paredes.

Assim, a cinza pesada provocou aumento do teor de ar aprisionado na argamassa projetada nessas paredes chapiscadas, especialmente as argamassas com 100% de CZP, possivelmente pela menor energia de projeção devido à menor massa específica dessas argamassas.

As argamassas com 50% de cinza pesada apresentaram menor variabilidade nos resultados do ensaio de aderência por tração, possivelmente por apresentarem melhor trabalhabilidade (não avaliada) devido aos arranjos entre a areia e a cinza pesada, causando melhor adesão inicial.

Os três ensaios de absorção mostraram que as argamassas com cinzas aumentam a absorção de água, principalmente nas argamassas com cinza pesada. Isso pode ser explicado pelo elevado índice de vazios dessas argamassas.

Outro aspecto importante a ser considerado é que tais ensaios foram realizados em argamassas com idades de 31 dias (imersão), 42 dias (capilaridade) e 35 dias (baixa pressão), e que podem melhorar e até superar os índices da argamassa de referência em idades mais avançadas, devido à redução dos poros ocasionados pelas reações pozolânicas e reações de carbonatação.

A cinza pesada apresentou efeito retardador superior à cinza leve. A causa disso pode ser a mesma que a provocada pela cinza leve; a diferença é o superior volume de cinza pesada em relação à cinza leve, que no caso extremo (20% CZL e 100% CZP) chega a 45 vezes, e a menor relação (50% CZL e 50% CZP) chega a 9 vezes (traço-base **1 : 2 : 9**).

Os ensaios de ATD e DRX utilizados para avaliar a evolução da resistência das argamassas apresentaram alguns resultados contraditórios, como por exemplo no ensaio de ATD, no qual se verificou a redução da formação de brucita pela cinza pesada entre o 63<sup>o</sup> e o 95<sup>o</sup> dias, fato este que não foi verificado no ensaio de DRX, no qual o teor de brucita se mantém proporcional aos teores de cinza pesada ao longo das idades, o que caracteriza a manutenção da brucita em teores estáveis nas idades estudadas.

Já o efeito redutor da formação de portlandita pela CZP foi constatado nos dois ensaios. No DRX, aos 95 dias, a argamassa sem CZP apresenta tendência em aumentar a portlandita, enquanto que nas argamassas com CZP essa tendência é reduzir. Porém nesta idade, as três argamassas apresentam praticamente a mesma intensidade de pico, confirmando a avaliação verificada no ensaio de ATD, no qual a partir do 63<sup>o</sup> dia houve um consumo da portlandita nas argamassas com CZP.

No ATD, a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) da cinza pesada reduz com a portlandita. No DRX, observou-se que a sílica da CZP é amorfa ou com fraca cristalinidade, o que a torna mais reativa. Na argamassa sem areia (100% de CZP), observou-se que a partir do 63<sup>o</sup> dia há redução proporcional entre a sílica da cinza e a portlandita, caracterizando as reações pozolânicas, confirmando o observado no ensaio de ATD.

Durante a cura, os corpos-de-prova para ATD e DRX foram mantidos isolados do contato com o  $\text{CO}_2$  do ar, razão pela qual a avaliação na evolução da calcita tornou-se prejudicada. Ainda assim, no ensaio de DRX, já a partir do 7<sup>o</sup> dia até o 95<sup>o</sup> dia, as



intensidades de pico da calcita mantiveram-se praticamente estáveis e semelhantes. No ensaio de ATD, o limite superior de temperatura (900°C) interrompeu a curva de leitura da calcinação da calcita.

Com relação aos materiais empregados, é importante citar que a cal utilizada neste estudo apresentou teores de óxido de cálcio (CaO) abaixo dos limites que classifica a cal hidratada pelos teores de CaO e MgO.

Com base nisso e considerando-se a caracterização química da cal mostrada na tabela 3.3 da página 46, pode-se citar que a cal utilizada, classificada pelo fabricante como CH-III, não apresenta os teores de óxidos totais ( $\geq 88\%$ ) especificados pela NBR 7175 (1992), além de apresentar teores de CaO baixos (41,07%).

Tabela 4.7 - Qualificação das argamassas pelas propriedades estudadas

| Propriedades                        | Limites mínimos           | Base          | Argamassas que atendem aos limites mínimos |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                     |                           |               | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Retenção                            | > 75%                     | ASTM          |  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Exsudação                           | $\leq 2,39$ ml            | $\leq$ Refer. |  |    |    |    |    |    |    |    | na |    |    |    |    |    | na |
| Tempo de Pega                       | < 6 horas                 | Admiss        |  | -  | na | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |    | -  | na |
| Massa Específica                    | $\leq 2,47\text{kg/dm}^3$ | $\leq$ Refer. |  |    |    |    |    |    | na |    |    | na |    |    |    |    |    |
| Compressão-90d                      | /1,64 MPa                 | / Refer.      |  |    |    |    |    |    | na |    |    | na |    |    | na |    |    |
| Aderência à tração                  | / 0,15 MPa                | / Refer.      | na   | na | na | na | na | na | na |    |    | na | na | na | na | na | na |
| Absorção de água                    | (I), (C), (BP)            | $\leq$ Refer. | na   | na | na | na | na | na | na | na | na | na | na | na | na | na | na |
| na – não atende aos limites mínimos |                           |               |  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Considerou-se o quadro da figura 4.35 para definir quais entre as propriedades estudadas fariam parte dos itens de avaliação do desempenho das argamassas. Essas propriedades avaliadas correspondem àquelas finais, isto é, que não influenciam outras propriedades estudadas. Para essas propriedades, foram definidos os limites aos quais as argamassas devem atender para qualificá-las para uso, conforme tabela 4.7.

A tabela 4.8 mostra a proporção ótima para cada propriedade final estudada.

Tabela 4.8 - Identificação dos teores de cinzas com melhor desempenho nas propriedades das argamassas estudadas

| Avaliação das propriedades finais | Proporção ótima        |                          |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|
|                                   | Teor de cinza leve (%) | Teor de cinza pesada (%) |
| Retenção de água                  | 20                     | 0                        |
| Exsudação                         | 20                     | 0                        |
| Tempo de pega*                    | 50                     | 0                        |
| Massa específica                  | 50                     | 100                      |
| Absorção de água                  | 50                     | 0                        |
| Resistência à compressão          | 30                     | 100                      |
| Aderência à tração                | 30                     | 50                       |

\* Avaliado somente para os teores de cinzas-limite

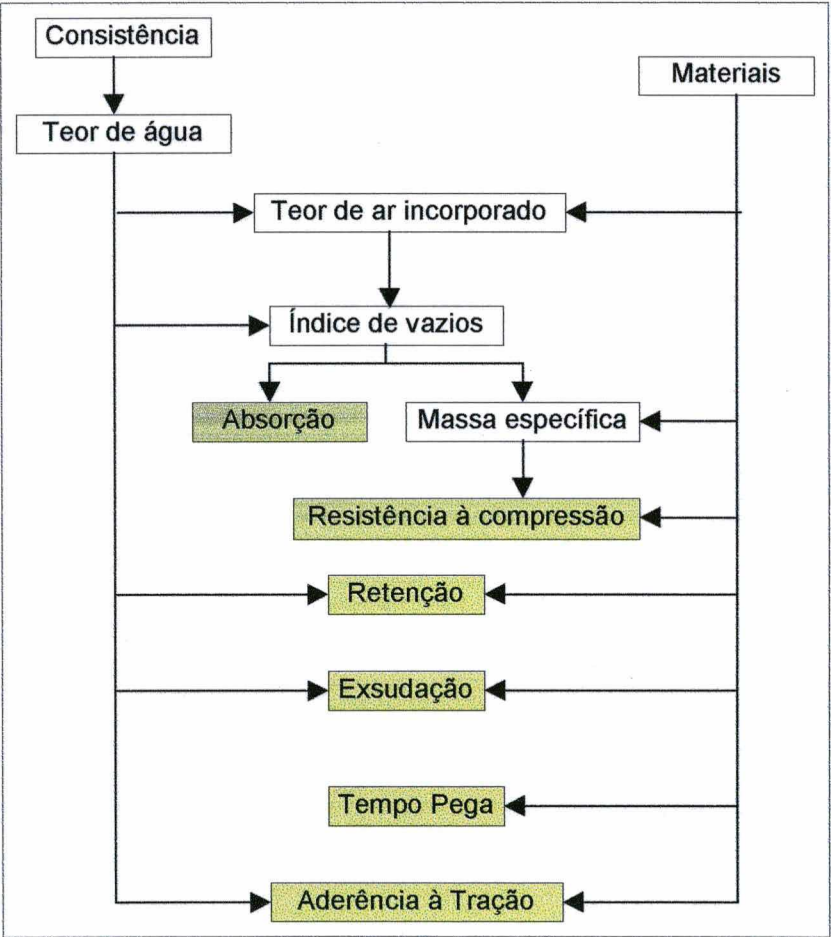


Figura 4.35 - Quadro esquemático de influência entre as propriedades das argamassas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

As substituições de cimento por cinza leve e areia por cinza pesada em argamassas de revestimento, nos limites estudados, trouxeram as seguintes conclusões:

#### 5.1.1 CINZA LEVE

Devido à sua pequena participação no volume das argamassas (entre 1 e 3%), a cinza leve causou efeitos reduzidos nas argamassas estudadas:

- i) manteve a mesma demanda de água do cimento em todos os teores de substituição;
- ii) apresentou tendência de redução do teor de ar incorporado, porém insignificante;
- iii) teve influência insignificante na retenção de água;
- iv) quando usada sem cinza pesada, reduz a exsudação;
- v) aumentou os tempos de início e fim de pega em 27 e 28%, respectivamente, para o teor máximo de substituição; o uso conjunto das cinzas retardou os tempos de início e fim de pega em 295 e 564%, respectivamente, para os teores máximos de substituição;
- vi) a massa específica das argamassas foi mantida nos níveis da argamassa de referência; o uso conjunto das cinzas houve redução de até 26%;
- vii) superou a resistência à compressão da argamassa de referência com substituição de 20% CZL a partir do 60º dia, caracterizando atividade pozolânica.
- viii) manteve o mesmo índice de vazios observado na argamassa de referência;
- ix) nos três ensaios de absorção realizados, a cinza leve não influenciou os resultados;
- x) a cinza leve não alterou a propriedade de aderência à tração, nos intervalos estudados.



### 5.1.2 CINZA PESADA

Ao contrário da cinza leve, a cinza pesada teve participação importante no volume das argamassas estudadas, entre 0 e 45% do volume total dos materiais constituintes das argamassas estudadas:

- i) houve um incremento maior no teor de água em volume quando se substituiu 50% de areia (8%) do que quando foram substituídos os 50% restantes da areia (4%) nas argamassas estudadas;
- ii) alterou o teor de ar incorporado nas argamassas. A correlação linear não foi importante em virtude de que nas substituições de 50% de areia o aumento do teor de ar incorporado foi de 8,5%, e nas substituições totais esse aumento foi de 615%;
- iii) reduziu a retenção de água, porém ainda mantém índice superior aos limites da norma ASTM C270-82;
- iv) quando usada sem cinza leve reduz a exsudação. O uso conjunto das cinzas aumenta a exsudação, porém somente as argamassas **9**, **12** e **15** (100% CZP respectivamente com 30, 40 e 50% de CZL) apresentaram exsudação superior à de referência;
- v) retardou os tempos de pega entre 200 e 384% para o teor máximo de substituição. O uso conjunto das cinzas retardou os tempos de início e fim de pega em 295 e 564%, respectivamente, para os teores máximos de substituição;
- vi) reduziu a massa específica das argamassas em até 25%. Para o uso conjunto das cinzas, essa redução chegou a 26%;
- vii) aumentou significativamente a resistência à compressão. Quando comparadas às resistências das argamassas com 100% de CZP, entre as idades de 7 e 90 dias, observou-se que aumentaram 140, 127, 184, 223 e 232%, respectivamente, nas argamassas com teores de 0, 20, 30, 40 e 50% de cinza leve, sendo que o período de maior desenvolvimento da resistência foi aquele compreendido entre 28 e 60 dias;
- viii) aumentou significativamente o índice de vazios, que é consequência do aumento do teor de água e o teor de ar incorporado em menor escala;
- ix) aumentou significativamente a absorção de água, seja por imersão, capilaridade ou baixa pressão;
- x) promoveu o aprisionamento do ar, quando a argamassa foi aplicada em substrato chapiscado;
- xi) a sílica da cinza pesada apresentou-se amorfa e com fraca cristalinidade, portanto reativa;
- xii) a sílica da cinza pesada reagiu com a portlandita formada pela hidratação do cimento e aquela proveniente da cal, caracterizando efeito pozolânico;
- xiii) o traço que obteve melhor desempenho nas propriedades estudadas foi aquele com 50% de cinza pesada e 30% de cinza leve (argamassa 8); nenhuma argamassa foi qualificada quanto à absorção de água.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a experiência adquirida no decorrer desta pesquisa, foram observados alguns aspectos importantes que poderão orientar a estruturação de novas pesquisas nessa área do conhecimento. Tais aspectos estão descritos abaixo.

Utilizou-se para esta pesquisa uma cal encontrada no mercado de Florianópolis (SC), na qual foram constatadas algumas irregularidades quanto aos teores fixados pela norma brasileira. Esse fato pode ser uma amostra significativa do que ocorre no mercado brasileiro, especialmente no mercado da cal. Diante disso, sugere-se a criação de um protocolo de qualificação das cales hidratadas.

Sugere-se avaliar os efeitos maléficos do periclásio contido nas cales dolomíticas e magnesianas, colaborando para definir os teores-limite desse composto nas argamassas de revestimento.

Quando forem avaliadas argamassas através da difração de raios x, pode ser excluída a areia, devido à elevada cristalinidade desse componente que, por isso, pode dificultar a interpretação de outras fases no difratograma. Esse procedimento pode também ser estendido para os ensaios de análise térmica diferencial.

Devido ao elevado teor de cinzas utilizado nessas argamassas, o tempo de pega pode comprometer o seu uso; assim, sugere-se estudar o efeito retardador dessas cinzas.

Nestes estudos houve indícios de que as argamassas com 50% de areia e 50% de cinza pesada apresentaram melhor trabalhabilidade quando aplicadas nas paredes. Assim, sugere-se que sejam estudados os efeitos dessas substituições na trabalhabilidade.

Nesta pesquisa, os ensaios para avaliar a aderência à tração das argamassas apresentaram elevada variabilidade. Para melhorar a avaliação dos resultados, sugere-se avaliar a adesão inicial, a trabalhabilidade, e controlar a energia de projeção e a de desempenho dessas argamassas.

Nas avaliações por análise térmica diferencial, sugere-se a exposição das amostras até atingir a temperatura de 1000°C; o que possibilitará contemplar o comportamento da calcita.



Os novos patamares de resistência à compressão alcançados com as substituições estudadas permitem a redução dos teores de cimento nessas argamassas. Para tanto, esta pesquisa auxilia, considerando-se os dados aqui expostos, a estruturação de nova pesquisa que investigue a redução dos teores de cimento.

Devido à alta porosidade das argamassas com cinzas da combustão de carvão mineral, sugere-se estudar o desenvolvimento da absorção de água até idades mais avançadas, no mínimo até 90 dias.

Com objetivo de melhor avaliar a durabilidade dessas argamassas, sugere-se que sejam submetidas ao ensaio de envelhecimento, módulo de deformação e retração.

E, por fim, relacionar a porosidade dessas argamassas com a sua resistência à compressão e módulo de deformação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Mortar for unit masonry*, ASTM C 270. Philadelphia, 1982.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento*, NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.
3. \_\_\_\_\_. *Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica*, NBR 6504. Rio de Janeiro, 1984.
4. \_\_\_\_\_. *Cal hidratada para argamassas*, NBR 7175. Rio de Janeiro, 1992.
5. \_\_\_\_\_. *Revestimentos de paredes e tetos com argamassas: materiais, preparo, aplicação e manutenção*, NBR 7200. Rio de Janeiro, 1982.
6. \_\_\_\_\_. *Agregado para concreto*, NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
7. \_\_\_\_\_. *Ensaio de cimento Portland*, NBR 7215. Rio de Janeiro, 1982.
8. \_\_\_\_\_. *Argamassas e concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*, NBR 7222. Rio de Janeiro, 1983.
9. \_\_\_\_\_. *Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária*, NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.
10. \_\_\_\_\_. *Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária*, NBR 7810. Rio de Janeiro, 1983.

11. \_\_\_\_\_. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*, NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.
12. \_\_\_\_\_. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*, NBR 9779. Rio de Janeiro, 1987.
13. \_\_\_\_\_. *Cimento Portland composto*, NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991.
14. \_\_\_\_\_. *Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega*, NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991.
15. \_\_\_\_\_. *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão*, NBR 13276. Rio de Janeiro, 1995.
16. \_\_\_\_\_. *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*, NBR 13278. Rio de Janeiro, 1995.
17. \_\_\_\_\_. *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão*, NBR 13279. Rio de Janeiro, 1995.
18. \_\_\_\_\_. *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração*, NBR 13528. Rio de Janeiro, 1995.
19. BAZUCO, R. S. *Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 1999.
20. BORBA, C. D. G. *Obtenção e caracterização de vitrocerâmicos de nefelina: medição de tamanho de cristalito e quantificação de fases por difração de raios X*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 2000.
21. CALMON, J. L., TRISTÃO, F. A., LORDÊLLO, F. S. S., DA SILVA, S. A. C., MATTOS, F. V. *Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a*

- produção de argamassas de assentamento. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Salvador, ANTAC, 1997. p. 64-75.
22. CALHAU, E. L., SPAGNOL, L. C., TINTI, M. M. Influência da relação cal/cimento no custo das argamassas mistas de revestimento. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Vitória, ANTAC, 1999. p. 171-181.
23. CAMPITELI, V. C., MASSARETTO, R., RODRIGUES, P. T. R. Argamassas mistas para a construção civil: o proporcionamento com base no desempenho. In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais*. ANTAC, 1995. p.769-775.
24. CARASEK, H., SELMO, S. M. S. O método de ensaio de determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa – A normalização pela ABNT. In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais*. São Paulo, ANTAC, 1993. p.261-270.
25. CARNEIRO, A. M. P., CINCOTTO, M. A., JOHN, V. M. “A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassas.” *Rev. Ambiente Construído*, São Paulo : v. 1, n. 2, p. 37-44, jul./dez., 1997.
26. CARNEIRO, A. M. P., CINCOTTO, M. A. Requisitos e critérios de desempenho para revestimento de camada única em argamassa de cimento e cal. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 326-337.
27. CARVALHO, C. H., CAVALCANTI JR, D. A. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Salvador, ANTAC, 1997. p. 162-172.
28. CAVANI, G. R., ANTUNES, R. P. N., JOHN, V. M. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas. In: II SIMPÓSIO



- BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Salvador, ANTAC, 1997. p. 110-119.
29. CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION. *Hydrofuges de surface : Choix et mise em oeuvre*, Bruxelles, 1982. 24p. (Note D'Information Technique 140).
  30. CHERIAF, M., CAVALCANTE ROCHA, J., PÉRA, J. "Pozzolan properties of pulverized coal combustion bottom ash." *Cement and concrete research*, n.29, p.1387-1391, 1999.
  31. CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. *Argamassas de revestimento : características, propriedades e métodos de ensaio*. São Paulo : Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. (Publicação IPT 2378).
  32. FALCÃO BAUER, R. J., RAGO, F. Influência da variação do índice de consistência nas propriedades das argamassas industrializadas. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Vitória, ANTAC, 1999. p. 85-94.
  33. FIORITO, A. J. S. I. *Manual de argamassas e revestimentos : estudos e procedimentos de execução*. São Paulo : Pini, 1994.
  34. GOMES, A. M., NERO, J. M. G., APPLETON, J. A. S. Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 83-91.
  35. GUIMARÃES, J. E. P. *A cal : fundamentos e aplicações na engenharia civil*. São Paulo : Pini, 1997.
  36. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Performance standards in building – contents and presentation*, ISO 6240. Geneva, 1980.
  37. LEA, F. M. *The chemistry of cement and concrete*. Glasgow : Bell and Bain Ltd., 1970.

38. LENZI, E. J., CAVALCANTE ROCHA, J. A influência da substituição de cimento e areia por cinza leve e cinza pesada no desempenho de argamassas. Submetido ao IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. Brasília, ANTAC, 2001.
39. LEVY, S. M., HELENE, P. R. L. Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 315-325.
40. LEVY, S. M., MARTINELLI, F. A., HELENE, P. R. L. A influência de argamassas endurecidas e resíduos cerâmicos, finamente moídos, nas propriedades de novas argamassas. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Salvador, ANTAC, 1997. p. 50-63.
41. MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. *Pozzolanic and cementitious materials*. Ottawa : Gordon and Breach Publishers, 1996.
42. MEHTA, P. K. *Supplementary cementing materials for concrete*. CANMET, Canadá, 1987.
43. MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto : estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo : Pini, 1994.
44. MIBIELLI, J. G. *Estudo da aderência de revestimentos cerâmicos externos*. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil ) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 1994.
45. MÜLLER, A. *Efeitos de sílica ativa e de látex polímero EVLC sobre as características de argamassas de assentamento*. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil ) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 1999.
46. NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo : Pini, 1997.

47. ODLER, I. "Strength of cement (final report)." *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Paris : n. 24, p. 143-157, 1991.
48. PIAZZA, J. L., RUI, V. Comportamento das cinzas pesadas de carvão mineral como substituto da areia quartzosa em argamassas. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Vitória, ANTAC, 1999. p. 389-401.
49. POZZOBON, C. E. *Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda*. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil ) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 1999.
50. QUARCIONI, V. A., CINCOTTO, M. A., CHOTOLI, F. F. Caracterização da composição de argamassas de assentamento e de revestimento –II : Diretrizes para normalização. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Vitória, ANTAC, 1999. p. 753-768.
51. RAGO, F., CINCOTTO, M. A. *Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP (BT/PCC/233). São Paulo, EPUSP, 1999.
52. RAVINA, D. "Properties of fresh concrete incorporating a high volume of fly ash as partial fine sand replacement." *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Paris : vol. 30, p. 473-479, oct 1997.
53. RAVINA, D. "Mechanical properties of structural concrete incorporating a high volume of Class F fly ash as partial fine sand replacement." *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Paris : vol. 31, p. 84-90, mar 1998.
54. RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX – RILEM. *Water-retention capacity of mortars*, MR4 (TC13-MR), Paris, 1982.



55. RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX – RILEM. *Tendency of water to separate from mortars (bleeding)*, MR6 (TC13-MR), Paris, 1982.
56. RISSATO, A. O., SOUZA, M. L. V. D. Utilização de cinzas de carvão – uma revisão. In: I ENCONTRO DE PESQUISADORES DE CARVÃO NO RIO GRANDE DO SUL. *Anais*. Porto Alegre, CIENTEC, 1985. p. 197-206.
57. ROSELLO, M. T. V. *Morteros de cemento para albañileria*. Madrid: I.E.T., 1976. apud SELMO, S. M. S. *Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios*. São Paulo, 1989. Dissertação de mestrado apresentada à EPUSP/DECC.
58. SABBATINI, F. H. *Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP (BT 02/86). São Paulo, EPUSP, 1986.
59. SABBATINI, F. H. *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária*. Dissertação de mestrado apresentada à EPUSP/DECC. São Paulo, 1984.
60. SELMO, S. M. S. *Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios*. Dissertação de mestrado apresentada à EPUSP/DECC. São Paulo, 1989.
61. SILVA, V. S., LIBÓRIO, J.B.L., SILVA, C. R. Argamassas de revestimento com o emprego de pozolana de argila calcinada. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Vitória, ANTAC, 1999. p. 323-333.
62. SINGH, M., GARG, M. "Durability of cementitious binder derived from industrial wastes." *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Paris : vol. 30, p. 607-612, dec 1997.
63. SIQUEIRA, N., SELMO, S. Estudo de caso de revestimentos externos de argamassas mistas e de cimento com solo fino beneficiado. In: I SIMPÓSIO



BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 271-282.

64. TRISTÃO, F. A., ROMAN, H. R. Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades mecânicas das argamassas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 283-294.
65. YOSHIDA, A. T., BARROS, M. M. S. B. Caracterização de argamassas no estado fresco – peculiaridades na análise de argamassas industrializadas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. *Anais*. Goiânia, ANTAC, 1995. p. 53-62.

7 ANEXOS

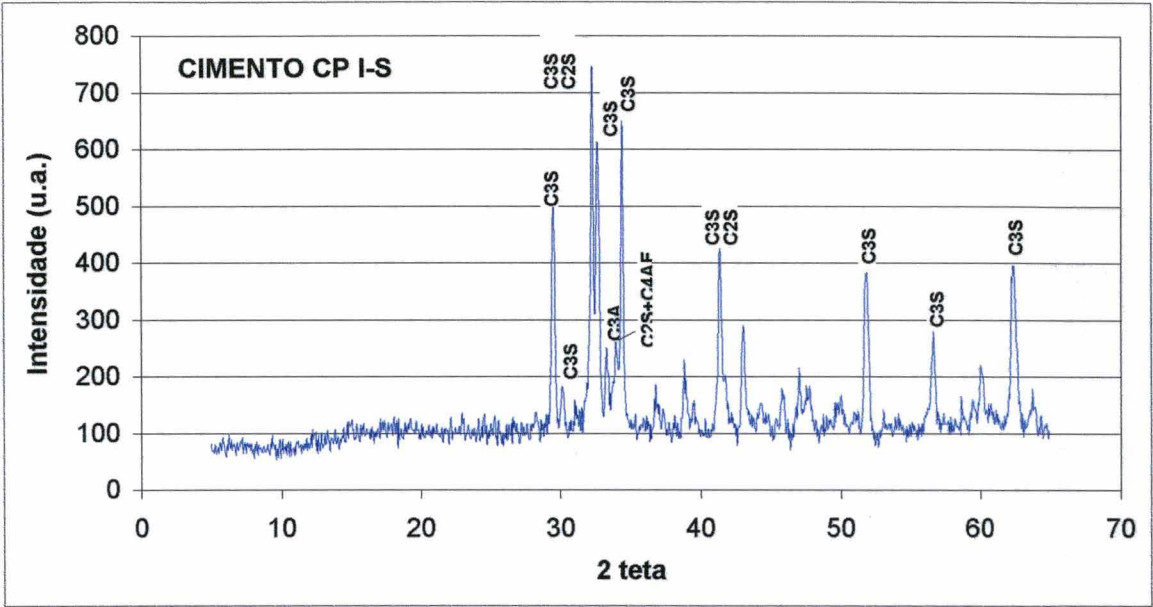


Figura A-1 - Difratoograma de raios X do cimento CP I S.

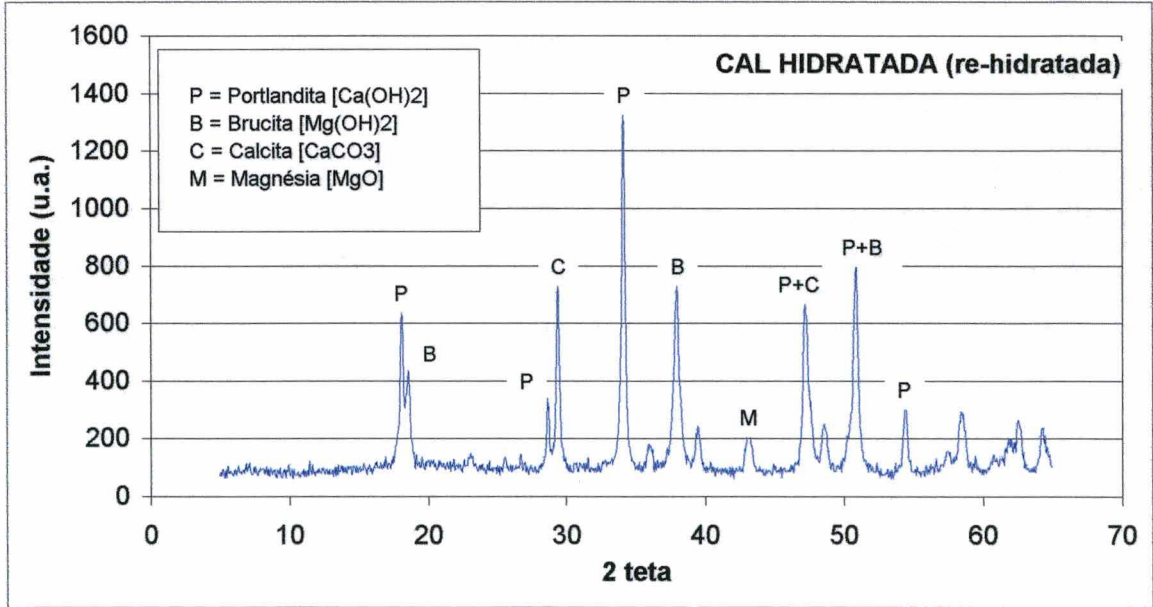


Figura A-2 - Difratoograma de raios X da cal hidratada após período de maturação.

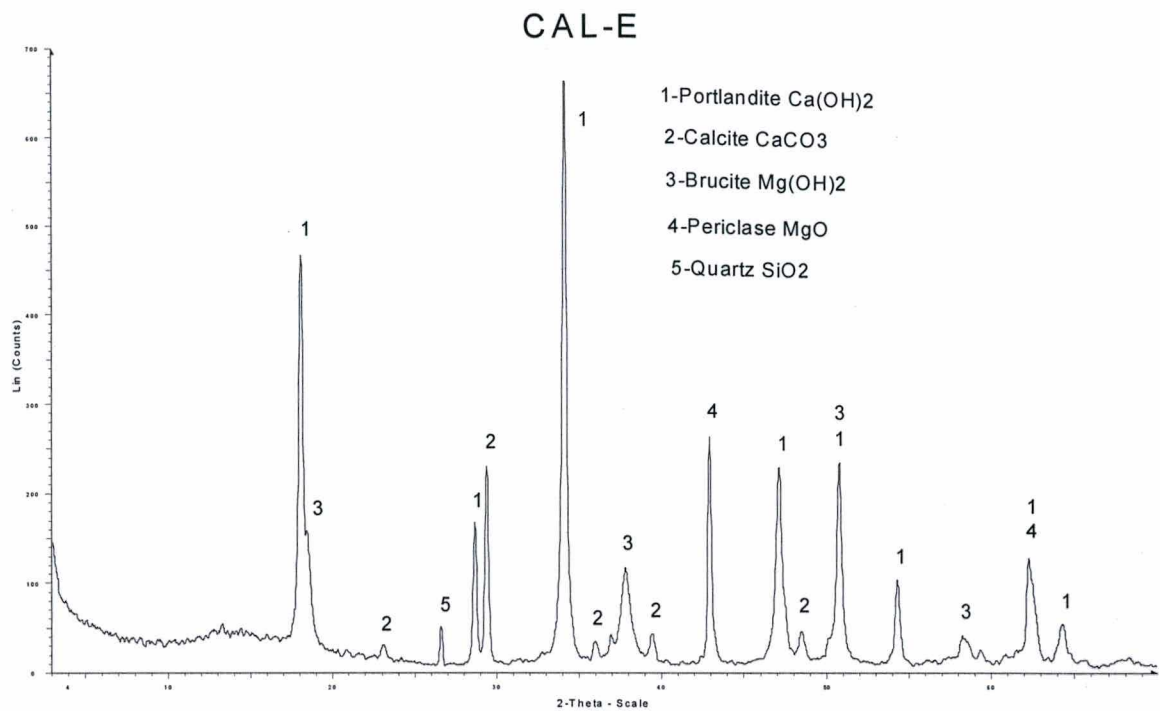


Figura A-3 – Difratoograma de raios X da cal hidratada antes do período de maturação.

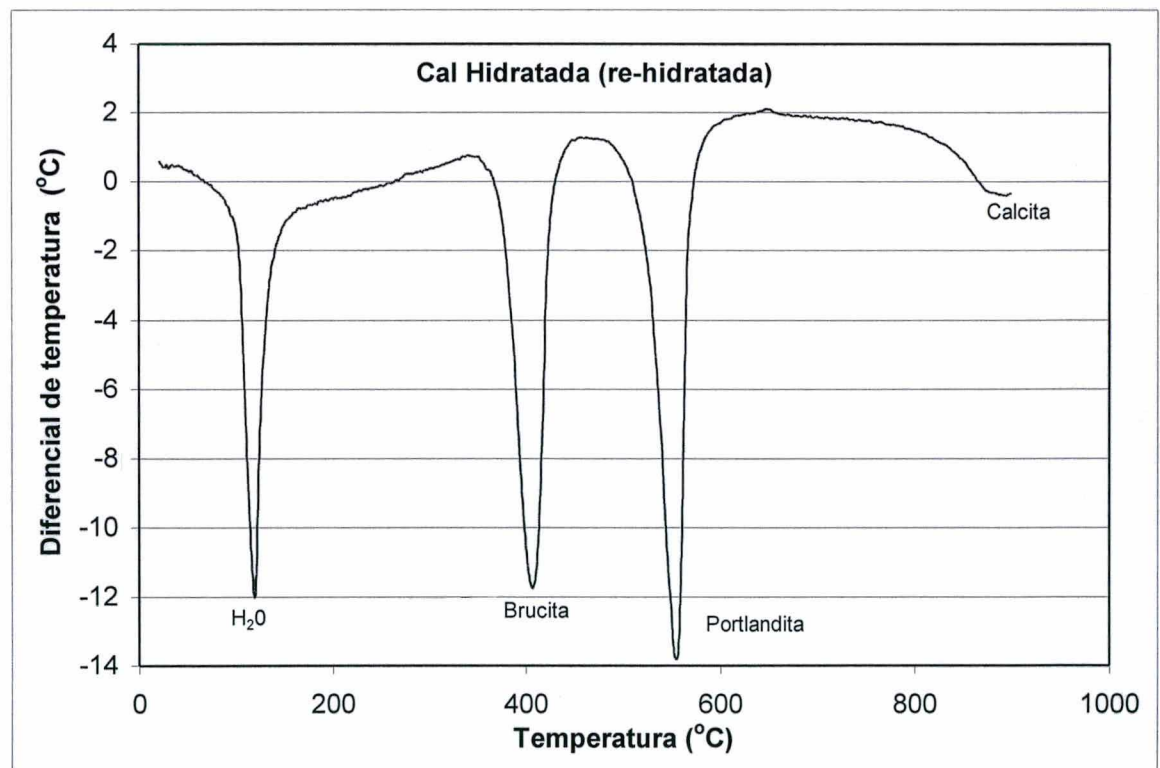


Figura A-4 - Análise térmica diferencial da cal hidratada após período de maturação.

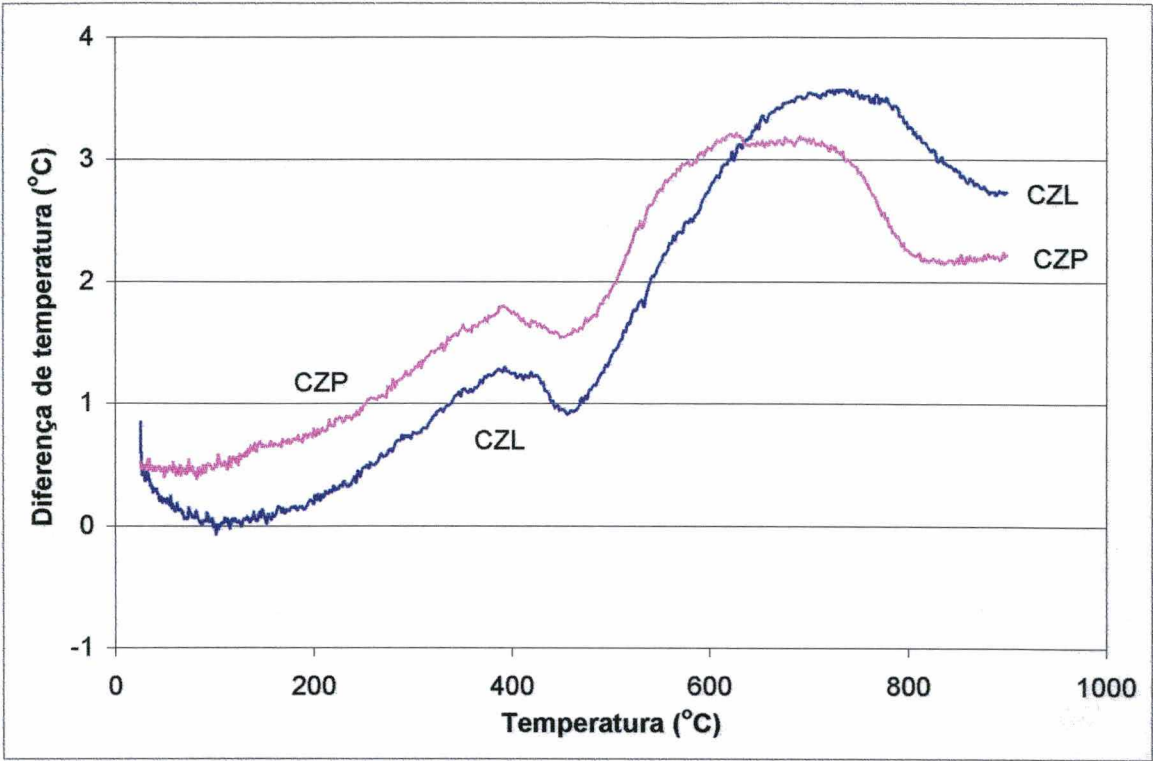


Figura A-5 - Análise térmica diferencial das cinzas leve e pesada usadas neste estudo.

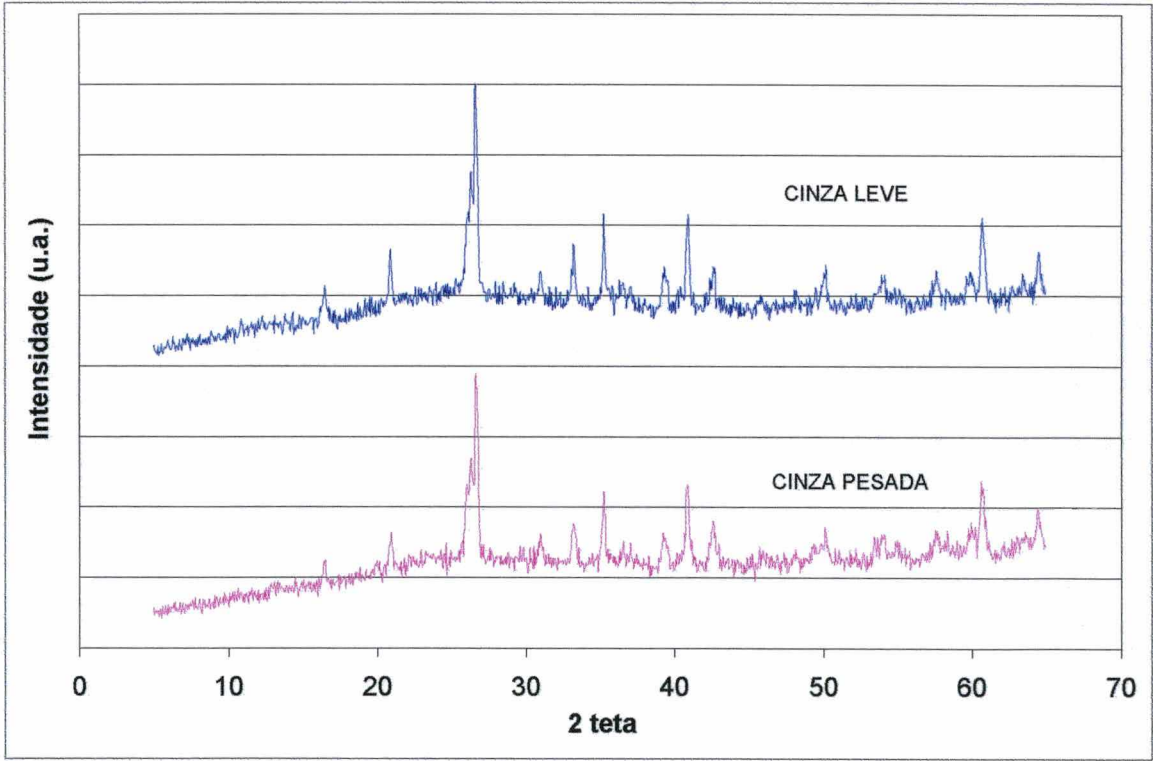


Figura A-6 - Difratoograma de raios X da cinza leve e cinza pesada.



Tabela A-1 - Laudo de análise - Cal hidratada CH-III (Cal Cem Ind. de Minérios Ltda., julho/2000)

| ENSAIOS QUÍMICOS              |  | Unidade | VALOR |
|-------------------------------|--|---------|-------|
| Perda ao fogo (PF)            |  | %       | 18,30 |
| Resíduo insolúvel             |  | %       | 2,00  |
| Óxido de Cálcio (CaO)         |  | %       | 47,85 |
| Óxido de Magnésio (MgO)       |  | %       | 29,06 |
| Óxidos totais (CaO + MgO)     |  | %       | 94,14 |
| Óxidos não hidratados         |  | %       | <15%  |
| Anidrido Carbônico            |  | %       | <5%   |
| ENSAIOS FÍSICOS               |  | Unidade | VALOR |
| Granulometria # 30 (0,60mm)   |  | %       | 0,07  |
| Granulometria # 200 (0,074mm) |  | %       | 6,00  |

Tabela A-2 - Resistência à compressão – Tratamento estatístico dos resultados

| ARGAMASSA<br>Nº | ESTATÍSTICA          | IDADE  |        |        |        | ARGAMASSA<br>Nº | IDADE  |        |        |        |
|-----------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                 |                      | 7 D    | 28 D   | 60 D   | 90 D   |                 | 7 D    | 28 D   | 60 D   | 90 D   |
| 1               | nº amostras          | 6      | 12     | 7      | 4      | 9               | 4      | 4      | 4      | 3      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,7966 | 1,1825 | 1,3542 | 1,6437 |                 | 0,4478 | 1,3197 | 3,0575 | 4,2928 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0191 | 0,0417 | 0,0473 | 0,0414 |                 | 0,0214 | 0,0492 | 0,0793 | 0,1324 |
|                 | Coef. Variação       | 2,4    | 3,5    | 3,5    | 2,5    |                 | 4,8    | 3,7    | 2,6    | 3,1    |
| 2               | nº amostras          | 4      | 4      | 4      | 4      | 10              | 4      | 3      | 7      | 4      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,7691 | 1,4456 | 2,2780 | 2,8966 |                 | 0,3874 | 0,5566 | 0,9222 | 1,1306 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0195 | 0,0419 | 0,0809 | 0,1209 |                 | 0,0051 | 0,0102 | 0,0413 | 0,0239 |
|                 | Coef. Variação       | 2,5    | 2,9    | 3,6    | 4,2    |                 | 1,3    | 1,8    | 4,5    | 2,1    |
| 3               | nº amostras          | 4      | 4      | 3      | 4      | 11              | 4      | 4      | 4      | 3      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,6825 | 1,6443 | 3,0726 | 3,9458 |                 | 0,3688 | 0,7400 | 1,5984 | 2,2408 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0144 | 0,0654 | 0,1107 | 0,0971 |                 | 0,0084 | 0,0183 | 0,0647 | 0,0533 |
|                 | Coef. Variação       | 2,1    | 4,0    | 3,6    | 2,5    |                 | 2,3    | 2,5    | 4,0    | 2,4    |
| 4               | nº amostras          | 4      | 4      | 4      | 4      | 12              | 4      | 4      | 4      | 4      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,7619 | 1,0951 | 1,3260 | 1,7113 |                 | 0,3518 | 1,0692 | 2,8774 | 3,6692 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0148 | 0,0534 | 0,0484 | 0,0442 |                 | 0,0158 | 0,0344 | 0,0519 | 0,1037 |
|                 | Coef. Variação       | 1,9    | 4,9    | 3,6    | 2,6    |                 | 4,5    | 3,2    | 1,8    | 2,8    |
| 5               | nº amostras          | 4      | 4      | 4      | 4      | 13              | 4      | 4      | 3      | 3      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,5528 | 1,0837 | 1,9831 | 3,1925 |                 | 0,2377 | 0,4662 | 0,8069 | 0,9603 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0189 | 0,0417 | 0,0553 | 0,0843 |                 | 0,0086 | 0,0122 | 0,0139 | 0,0526 |
|                 | Coef. Variação       | 3,4    | 3,9    | 2,8    | 2,6    |                 | 3,6    | 2,6    | 1,7    | 5,5    |
| 6               | nº amostras          | 3      | 3      | 3      | 3      | 14              | 3      | 4      | 3      | 3      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,5148 | 1,4347 | 2,7832 | 3,8958 |                 | 0,2477 | 0,6551 | 1,6077 | 2,2711 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0090 | 0,0392 | 0,1333 | 0,1230 |                 | 0,0107 | 0,0233 | 0,0373 | 0,0780 |
|                 | Coef. Variação       | 1,7    | 2,7    | 4,8    | 3,2    |                 | 4,3    | 3,6    | 2,3    | 3,4    |
| 7               | nº amostras          | 3      | 4      | 3      | 3      | 15              | 3      | 4      | 3      | 4      |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,5318 | 0,8729 | 1,1068 | 1,5153 |                 | 0,2541 | 1,0940 | 2,3422 | 3,1920 |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0277 | 0,0329 | 0,0478 | 0,0194 |                 | 0,0123 | 0,0302 | 0,1087 | 0,0351 |
|                 | Coef. Variação       | 5,2    | 3,8    | 4,3    | 1,3    |                 | 4,8    | 2,8    | 4,6    | 1,1    |
| 8               | nº amostras          | 3      | 4      | 4      | 4      |                 |        |        |        |        |
|                 | R <sub>c</sub> média | 0,4321 | 0,9372 | 1,8357 | 2,7981 |                 |        |        |        |        |
|                 | Desv. Padrão         | 0,0129 | 0,0093 | 0,0547 | 0,1180 |                 |        |        |        |        |
|                 | Coef. Variação       | 3,0    | 1,0    | 3,0    | 4,2    |                 |        |        |        |        |